NÚMERO MONOGRÁFICO | 9 PREGUNTAS CLAVE SOBRE NUESTRO FUTURO

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

40 ANIVERSARIO 1976 - 2016

Noviembre 2016

Edición española de Scientific American | InvestigacionyCiencia.es



El planeta y nuestra especie están cambiando. **¿Qué nos espera?**

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

EL FUTURO DEL PLANETA Y LA ESPECIE HUMANA

NOVIEMBRE 2016 N.º 482

00482

9 770210 136004

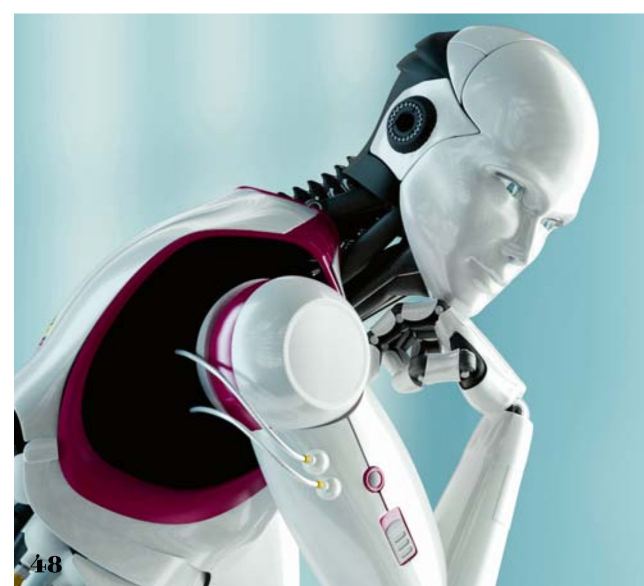
6,90 EUROS

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA
Noviembre 2016, Número 482



ANDREW MYERS







INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

«Hacer predicciones es muy difícil, sobre todo cuando se trata del futuro.» Sin olvidar esta famosa advertencia del físico Niels Bohr, en este número monográfico nos hemos propuesto averiguar qué puede decirnos la ciencia sobre el modo en que las transformaciones que están sufriendo el planeta y la especie humana dibujarán el horizonte de nuestro mundo. Ilustración de Charles Williams.



redaccion@investigacionyciencia.es



Junio 2016

EL ENIGMA DEL NEUTRÓN

En «El enigma del neutrón» [Investigación y Ciencia, junio de 2016], Geoffrey L. Greene y Peter Geltenbort refieren la existencia de una diferencia de unos nueve segundos en el tiempo de vida media del neutrón, dependiendo de si este se mide empleando el «método del confinamiento» o el «método del haz», las dos técnicas más precisas conocidas hasta la fecha.

¿Podría ocurrir que el método del haz arrojase un valor algo mayor para la vida media del neutrón debido a la dilatación relativista del tiempo asociada a la mayor velocidad de estas partículas?

David Lapadula
Raleigh, Carolina del Norte

Como admiten los autores, parece posible argumentar que las diferencias observadas en la vida media del neutrón obedezcan a la técnica usada en cada caso. ¿Tal vez el campo electromagnético empleado en el método del haz afecte de alguna manera al proceso de desintegración de la partícula?

Loretta Brown
Grand Blanc, Michigan

Responden los autores: *Con respecto a la primera pregunta, varios lectores han sugerido que, debido a la diferencia en la velocidad de los neutrones empleados en uno y otro experimento, la dilatación relativista del tiempo podría explicar la discrepancia. Dicho efecto es real: sabemos que, si una partícula inestable se mueve a velocidades próximas a la de la luz, su vida media en el sistema de referencia del laboratorio (en el que la partícula se está moviendo) es mayor que en el sistema de referencia móvil asociado a la propia partícula (en el que la partícula se encuentra en reposo). En el método del haz, la velocidad típica de los neutrones asciende a unos 1000 metros por segundo, mientras que en el del confinamiento solo llega a unos pocos metros por segundo. Sin embargo, en ambos casos se trata de velocidades mucho menores que la de la luz, por lo que las correcciones relativistas apenas son de unos pocos nanosegundos: una milmillonésima parte del efecto observado.*

En cuanto a la segunda observación, también varios lectores han señalado que, con el método del haz, los neutrones se encuentran inmersos en un campo magnético, algo que no ocurre en los experimentos de confinamiento. Si el campo magnético fuese muy intenso —muchísimo mayor que el utilizado en la técnica del haz—, el efecto sobre las partículas con carga eléctrica producidas en la desintegración (electrones y protones) podría modificar el resultado en una cantidad detectable. Dicho efecto puede estimarse con fiabilidad, ya que conocemos muy bien la dinámica de la desintegración del neutrón. Pero, para cualquier campo magnético generado en el laboratorio, el fenómeno es demasiado minúsculo para dar lugar a un cambio detectable. Otros experimentos más recientes efectuados con trampas magnéticas, en las que sí existe un fuerte campo magnético, arrojan resultados compatibles con este análisis.

MASIFICACIÓN EN LAS GALÁPAGOS

En «Presión turística sobre la vida silvestre de las Galápagos» [Investigación y Ciencia, agosto de 2016], Paul Tullis expone el dilema al que se enfrenta el Gobierno de Ecuador para mantener el número de visitantes a las islas Galápagos en niveles que no supongan una amenaza para este ecosistema único y, al mismo tiempo, mantener los ingresos derivados del turismo.

Este parece ser un ejemplo clásico de un problema de economía cuya solución se conoce bien: cobrar una tasa adecuada. Deberían exigirse permisos a aquellos turistas extranjeros que quieran visitar las islas, y expedirlos a un coste lo suficientemente elevado para que el número de visitantes se autorregule hasta alcanzar el nivel deseado.

David Hoffman

LAS CICATRICES DE PANGEA

En «Erupciones volcánicas y extinciones masivas» [Investigación y Ciencia, agosto de 2016], de Howard Lee, se incluye un mapa que muestra las «grandes provincias ígneas» asociadas a varias extinciones masivas ocurridas en la Tierra. En él, las áreas pertenecientes a la provincia centro-atlántica parecen coincidir (excepto la situada en la costa nororiental de América del Norte) con el lugar en el que Norteamérica, Sudamérica y África se hallaban unidas en la época en que existía el supercontinente Pangea. ¿Hay alguna relación entre este último y la ubicación actual de la provincia ígnea centro-atlántica?

Mike Keck

Responde Lee: *En efecto, la provincia ígnea centro-atlántica marca la «herida abierta» del desmembramiento de Pangea. Como ha deducido el lector, varias de las partes de esa provincia ígnea que hoy se encuentran separadas por el océano Atlántico estuvieron conectadas en la época de las erupciones. El área que hoy se halla en el noreste de Estados Unidos tiene su homólogo en África noroccidental, en particular en Marruecos.*



Agosto 2016

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



UN GRUPO DE VETERINARIOS examina una cría de reno a raíz del brote de ántrax en la península siberiana de Yamal.

CAMBIO CLIMÁTICO

Las epidemias resucitadas del permafrost

La fusión de grandes porciones de suelo helado en todo el planeta ha comenzado a liberar microorganismos infecciosos que permanecían atrapados en el hielo

El pasado verano, el carbunco (también conocido como ántrax) mató a un niño de 12 años en un remoto lugar de Siberia. Al menos una veintena de personas de la misma península de Yamal contrajeron esta enfermedad mortal, y casi otro centenar fueron hospitalizadas ante la sospecha de infección. Al mismo tiempo, más de 2300 renos de la región morían por la misma razón. ¿La causa más probable? La fusión del permafrost. Según las autoridades rusas, la desaparición de la capa de suelo otrora permanentemente congelada liberó esporas de *Bacillus anthracis* que acabaron incorporándose a la cadena trófica. Hacía 75 años que la zona no sufría un brote epidémico.

Hace años que los expertos vienen advirtiendo de que una de las consecuencias del calentamiento del planeta será que todo lo que se encuentre congelado en el permafrost, como bacterias antiguas y agentes infecciosos contra los que no estamos inmunizados, quedará libre con el alza de las temperaturas. Ahora, esa hipótesis parece estar haciéndose realidad.

A pesar de que el carbunco se halla de forma natural en el suelo y causa brotes en otras zonas no heladas, la fusión del permafrost ártico podría aumentar el número de personas expuestas a la bacteria. En un artículo publicado en 2011 en *Global Health Action*, Boris A. Revich y Marina A. Podolnaya escribían: «Como consecuencia de la fusión del permafrost, podrían volver los vectores de algunas epidemias mortíferas de los siglos XVIII y XIX, sobre todo cerca de los cementerios donde se enterró a las víctimas».

Y es un hecho que el permafrost se está derritiendo, incluso en latitudes y a profundidades sin precedentes. En varias partes de Siberia, la capa de suelo superficial puede llegar a fundirse a una profundidad de hasta medio metro durante el verano. Este año, sin embargo, una ola de calor azotó la región y provocó temperaturas de 35 grados centígrados, 25 más de lo habitual. Eso posiblemente extendió o ahondó la fusión del permafrost y liberó microorganismos que hasta entonces habían permanecido apresados en el suelo helado. Los expertos aún deben calcular la profundidad total, pero postulan una cifra nunca antes vista en casi un siglo de mediciones. Según un estudio publicado en 2013 en *Science*, bastarían unas temperaturas solo ligeramente mayores que las actuales para que la desaparición del permafrost se convirtiese en un fenómeno generalizado. Y, por otra parte, las olas de calor en

las latitudes altas son cada vez más frecuentes.

Las verdaderas consecuencias de la fusión del permafrost dependerán de las características del agente infeccioso en cuestión. Aunque numerosos microorganismos son incapaces de sobrevivir en el frío extremo, hay otros que pueden aguantar tales condiciones durante años. «*B. anthracis* es especial, pues se trata de una bacteria esporulada», explica Jean-Michel Claverie, de la Universidad de Aix-Marsella y jefe del Instituto Mediterráneo de Microbiología. «Las esporas son muy resistentes y, al igual que las semillas, pueden llegar a sobrevivir durante siglos.»

También algunos virus pueden sobrevivir largos períodos de tiempo. En 2014 y 2015, Claverie y su colaboradora Chantal Abergel publicaron sus conclusiones sobre dos virus encontrados en un fragmento de permafrost siberiano de 30.000 años de antigüedad, los cuales aún conservaban su capacidad infecciosa. Y si bien *Pithovirus sibericum* y *Mollivirus sibericum* solo infectan amebas, el hallazgo constituye una indicación de que otros virus que sí causan enfermedades humanas, como el de la viruela o la gripe de 1918 (gripe española), podrían haber permanecido conservados en el permafrost.

También cabe la posibilidad de que reaparezcan virus incluso más remotos, como aquellos que acompañaron a los primeros humanos que poblaron el Ártico. «Hay indicios de que los neandertales y los denisovanos habitaron en el norte de Siberia [y] sufrieron el azote de varias enfermedades víricas; algunas conocidas, como la viruela, y otras que podrían haber desaparecido», advierte Claverie. «El hecho de que una infección que afligió a los antiguos homininos pueda tener continuidad hoy entre nosotros resulta a la par fascinante y preocupante.»

Janet Jansson, experta en permafrost del Laboratorio Nacional del Pacífico Noroeste, en Washington, no se muestra preocupada por los virus antiguos: varios intentos de encontrar dichos agentes infecciosos en cadáveres se han saldado sin éxito, señala. Sin embargo, la investigadora aboga por seguir estudiando el amplio abanico de microbios presentes en el permafrost, algunos de los cuales podrían ser nocivos para la salud. Con ese objetivo en mente, Jansson y otros expertos están usando las herramientas moleculares modernas, como la secuenciación de ADN y el análisis de proteínas, para clasificar las propiedades de todos esos microorganismos desconocidos, apodados en ocasiones «materia oscura microbiana».

La probabilidad y la frecuencia con que podrían aparecer nuevos brotes similares al de Siberia dependerán de la velocidad y el curso que tome el cambio climático. Por ejemplo, es posible que otra ola de calor exponga los cadáveres de animales infectados por el carbunco, asegura Revich. «La situación en la península de Yamal ha demostrado que el riesgo de propagación del carbunco es real», añade.

Es imposible saber o predecir la virulencia o el momento preciso en que se liberarán los patógenos enterrados en el permafrost. Pero los especialistas creen que, en lo que respecta a las enfermedades infecciosas y el calentamiento, la principal amenaza no se halla en la fusión del permafrost, sino en la expansión de las áreas geográficas asociadas a las enfermedades infecciosas modernas y sus respectivos vectores, como los mosquitos. «Ahora tenemos dengue en el sur de Texas», explica George C. Stewart, titular de la cátedra McKee de patogenia microbiana y jefe del departamento de biopatología veterinaria de la Universidad de Misuri. «El paludismo ya está presente en altitudes y latitudes más altas a causa del ascenso de las temperaturas. Y el causante del cólera, *Vibrio cholerae,* se reproduce mejor en los entornos cálidos.»

A diferencia de los microorganismos «resucitados» del permafrost, las enfermedades infecciosas actuales se conocen muy bien, y existen métodos de eficacia probada para ponerles freno: trazar su avance, eliminar los focos donde proliferan los mosquitos y fumigar con insecticida. Y, por supuesto, una reducción drástica de las emisiones causadas por la quema de combustibles fósiles permitiría abordar de una tacada ambos problemas: tanto el regreso de antiguos patógenos mortíferos como la expansión de las enfermedades infecciosas actuales.

—*Sara Goudarzi*

THOMAS FUCHS

TECNOLOGÍA

Llega el prisma acústico

Un nuevo dispositivo es capaz de separar el sonido en sus frecuencias constituyentes sin recurrir a técnicas digitales

Hace casi cuatro siglos, Isaac Newton demostró que un prisma de vidrio dividía la luz blanca en todos los colores del arcoíris. Ahora, un equipo de ingenieros eléctricos ha construido un dispositivo que hace algo similar con el sonido: separarlo en sus frecuencias constitutivas a partir de medios exclusivamente mecánicos.

Bautizado como «prisma acústico», el aparato consta de un tubo de aluminio de 40 centímetros de largo con diez agujeros a un lado. El interior se encuentra dividido en cámaras por varias membranas de polímero flexible, las cuales vibran y transmiten el sonido a las cavidades vecinas con un retraso que depende de la frecuencia sonora. Cuando, una vez retrasadas, las ondas escapan por los agujeros, se refractan en distintas direcciones, de modo que aquellas con frecuencias más bajas (análogas a la luz roja) se oyen en el extremo más cercano a la fuente, mientras que las de frecuencias más elevadas (análogas a la luz azul) se refractan más allá. «El aparato imita la manera en que una gota de agua o un prisma de vidrio refractan cada color en diferentes ángulos», explica Hussein Esfahlani, experto en procesamiento de señal del Instituto Federal Suizo de Tecnología de Lausana. El diseño del dispositivo apareció publicado hace poco en el *Journal of the Accoustical Society of America*.

Esfahlani cuenta que el prisma tiene su origen en un experimento mental. Desde un punto de vista práctico, sin embargo, podría usarse para separar las frecuencias significativas de una entrada consistente en «ruido blanco» o para determinar con precisión el lugar del que procede una frecuencia concreta. «Es una forma muy elegante y eficaz de distinguir frecuencias sonoras», apunta Nicholas Fang, catedrático de ingeniería mecánica del Instituto de Tecnología de Massachusetts que no participó en el proyecto.

—*Knvul Sheikh*

SALUD PÚBLICA

Mosquitos al rescate

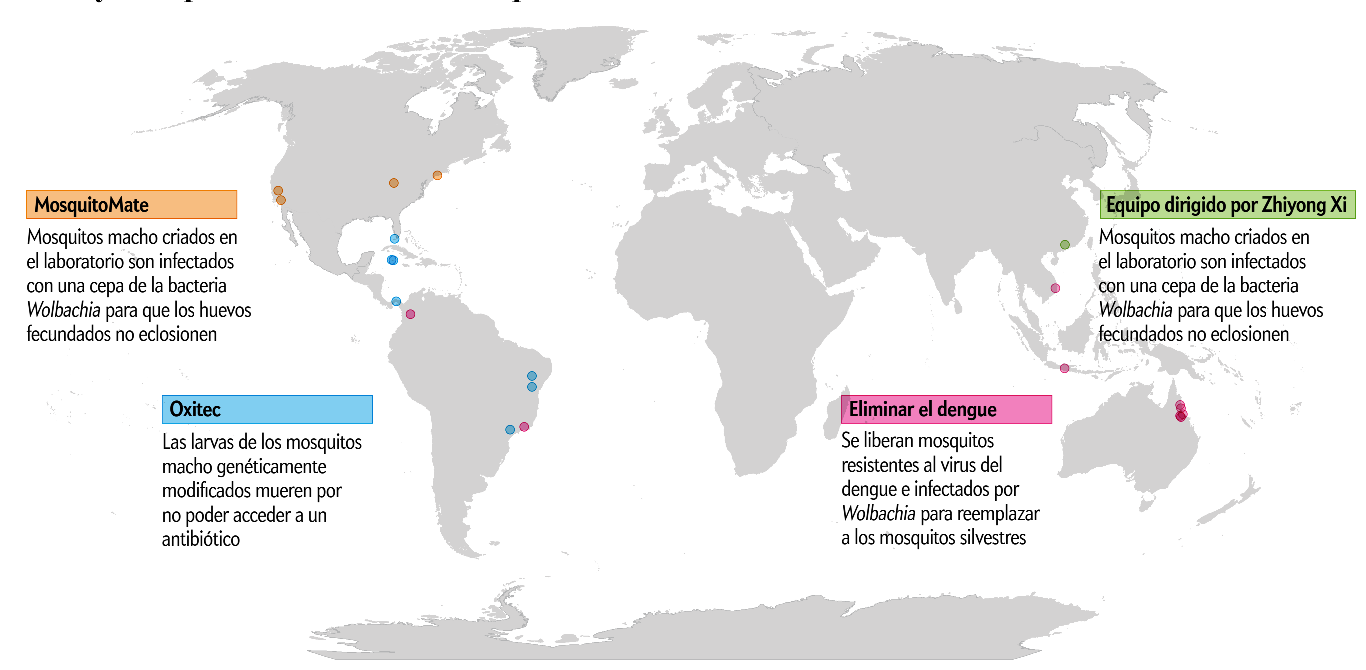
Los científicos están recurriendo a estos hematófagos infecciosos como aliados en su lucha contra las enfermedades

Este mes, en Key Haven y en el condado de Monroe, en Florida, se someterá a votación el que podría ser el primer experimento de suelta de mosquitos genéticamente modificados en Estados Unidos. Si el Distrito para el Control de los Mosquitos de los Cayos de Florida aprueba el ensayo, la empresa de biotecnología británica Oxitec procederá a la liberación de millones de mosquitos mutantes machos que precisan de un antibiótico para permanecer vivos hasta la edad adulta. Estos machos transmitirán esa dependencia a su progenie, que indefectiblemente morirá por no tener acceso al medicamento. El drástico descenso de la población que ello provocará reducirá el riesgo de contraer enfermedades transmitidas por este insecto, como el dengue (del que Key Haven sufrió un brote en 2009 y 2010) o la incipiente amenaza del virus del Zika.

Muchos en Key Haven han expresado su preocupación por el hecho de que en el vecindario pululen insectos genéticamente modificados, pero expertos externos afirman que serán inocuos. «La estrategia elegida por Oxitec con los mosquitos genéticamente modificados no entraña riesgo alguno [para la salud]», asegura Thomas Miller, profesor emérito de entomología de la Universidad de California en Riverside. Y si bien este será el primero en Estados Unidos, los ensayos de campo efectuados por Oxitec en otros países se han saldado con una acusada reducción del número de mosquitos, superior al 90 por ciento, sin indicios de efectos indeseados preocupantes. A ellos se suman, en el último lustro, docenas de experimentos con mosquitos modificados en todo el globo, con el fin de detener la propagación de las enfermedades transmitidas por estos insectos. Mantengamos cerca a nuestros amigos y lejos a nuestros enemigos.

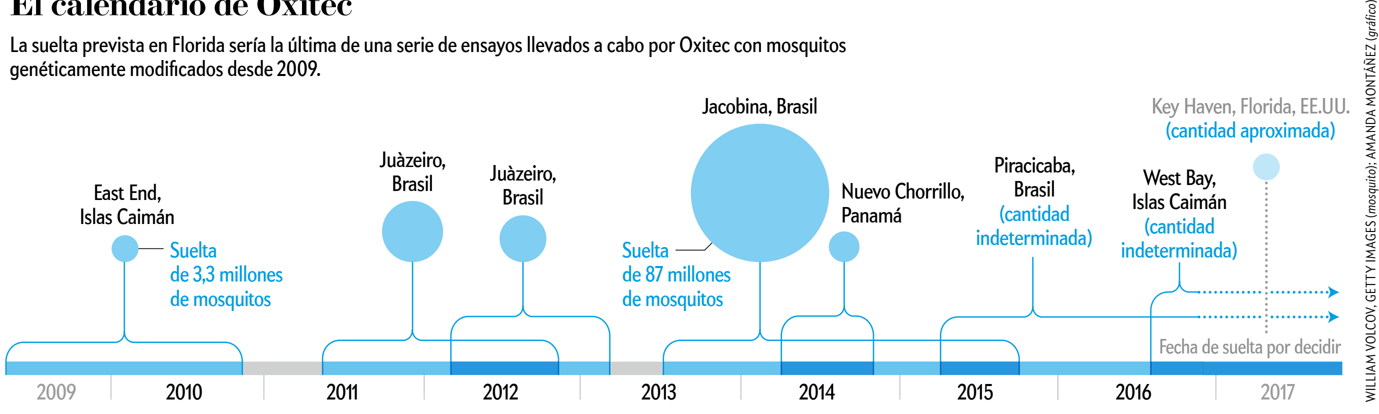
—Jeremy Hsu

Ensayos experimentales con mosquitos en el mundo



El calendario de Oxitec

La suelta prevista en Florida sería la última de una serie de ensayos llevados a cabo por Oxitec con mosquitos genéticamente modificados desde 2009.



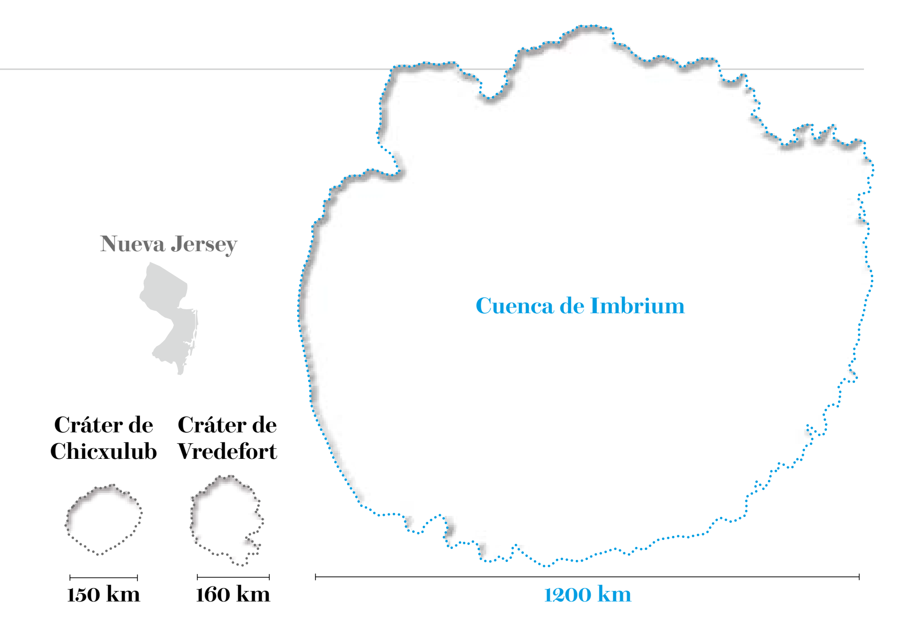
WILLIAM VOLCOV, GETTY IMAGES *(mosquito)*; AMANDA MONTAÑEZ *(gráfico)*

SISTEMA SOLAR

Nuevos datos sobre un gigantesco cráter lunar

El Hombre de la Luna tiene un enorme ojo derecho: el cráter de 1200 kilómetros de ancho conocido como cuenca de Imbrium. Dicha cavidad se creó hace unos 4000 millones de años como consecuencia del impacto de algún objeto descomunal. ¿Cómo de grande? «Más o menos como Nueva Jersey», explica Peter H. Schultz, geocientífico de la Universidad Brown, que acaba de publicar en *Nature* un nuevo cálculo de las dimensiones del objeto. Para determinarlas, Schultz y su colaborador David A. Crawford analizaron los surcos que emanan del lugar del impacto y que fueron causados por aquellos fragmentos del objeto que salieron disparados en otras direcciones. Para calcular el tamaño de la roca, su velocidad y su ángulo de impacto, los investigadores se valieron de las mediciones de dichos surcos y de experimentos de laboratorio. La cifra así obtenida es diez veces mayor que la que arrojaban las estimaciones previas, basadas en simulaciones por ordenador. Schultz observa que todo esto nos recuerda lo poco que aún sabemos sobre el sistema solar primitivo.

—Karl J. P. Smith



EN CIFRAS

10 kilómetros
Diámetro estimado del cuerpo causante del cráter Chicxulub, que cayó hace unos 66 millones de años en el actual Nuevo México y contribuyó a la desaparición de los dinosaurios.

10 kilómetros
Diámetro estimado del asteroide que formó el cráter Vredefort, en Sudáfrica, el mayor cráter confirmado como tal en la superficie terrestre.

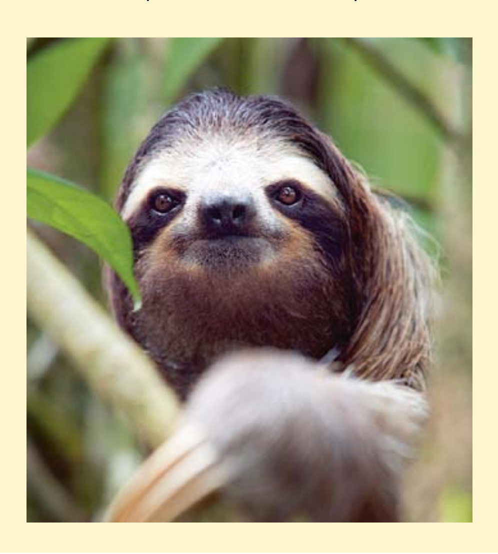
250 kilómetros
Nuevo diámetro estimado del asteroide que creó la cuenca de Imbrium, en la Luna.

COMPORTAMIENTO ANIMAL

La pereza como rasgo evolutivo

La parsimonia y la capacidad para variar la temperatura corporal convierten a los perezosos en campeones de la lentitud

Tras siete años de estudio del perezoso tridáctilo, un grupo de científicos de la Universidad de Wisconsin-Madison lo ha hecho oficial: se trata del mamífero más lento del planeta, también desde el punto de vista metabólico. «Esperábamos un índice metabólico bajo, pero lo que hemos encontrado es un consumo de energía *tremendamente* bajo», explica el ecólogo Jonathan Pauli. Para llegar a esta conclusión, Pauli y M. Zachariah Peery midieron el índice metabólico de 10 perezosos tridáctilos y 12 bidáctilos de Costa Rica y compararon los resultados con estudios similares de otras 19 especies de mamíferos folívoros. Con un índice metabólico de 162 kilojulios por día y kilogramo de peso, el perezoso tridáctilo necesita menos energía que el koala, cuyo consumo asciende a 410 kilojulios diarios por kilogramo. Los perezosos bidáctilos, por su parte, muestran un gasto energético de 234. Con 185 kilojulios, el panda gigante es el único que hace sombra al mamífero más lento del planeta.



Según el estudio, publicado en agosto en *American Naturalist*, el perezoso exhibe toda una serie de adaptaciones anatómicas, fisiológicas y conductuales que le permiten llevar una vida de mínimo esfuerzo en las selvas de América Central y del Sur. Por ejemplo, vive y se mueve en áreas reducidas, y dedica casi todo el tiempo a comer, descansar y dormir. También posee la rara capacidad de ajustar su termostato interno: «Son ligeramente heterotermos, por lo que pueden variar su temperatura unos 5 grados Celsius para aparejarla con la del ambiente. Eso les permite ahorrar mucha energía», explica Pauli. ¿Quién dijo que la pereza era un pecado capital?

—Eduardo García

FUENTES: «ORIGIN AND IMPLICATIONS OF NON-RADIAL IMBRIUM SCULPTURE ON THE MOON», POR PETER H. SCHULTZ Y DAVID A. CRAWFORD EN *NATURE*, VOL. 535, 21 DE JULIO DE 2016 (*perfil de la cuenca de Imbrium y diámetro del asteroide*); «THE CHICXULUB ASTEROID IMPACT AND MASS EXTINCTION AT THE CRETACEOUS-PALEOGENE BOUNDARY», POR PETER H. SCHULTZ ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 327, 5 DE MARZO DE 2010 (*diámetro del objeto de Chicxulub*); «CONSTRAINTS ON THE SIZE OF THE VREDEFORT IMPACT CRATER FROM NUMERICAL MODELING», POR E. P. TURTLE Y E. PIERAZZO EN *METEORITICS & PLANETARY SCIENCE*, VOL. 33, N.º 3, MAYO DE 1998 (*diámetro del asteroide de Vredefort*); AMANDA MONTÁÑEZ (*gráfico*); RAÚL BARRERO, GETTY IMAGES (*perezoso*)



AMBIENTE

Una huella por hogar

Las pisadas de los elefantes bullen de vida

Cuando uno llega a pesar más de 6000 kilogramos, deja huella —literalmente— allá por donde va. Así sucede con el elefante africano (*Loxodonta africana*), que, según investigaciones inéditas, es un benefactor para docenas de animalillos minúsculos.

En su tránsito por la selva o la sabana, hoya el suelo con grandes pisadas de hasta 30 centímetros de hondo. Si se llenan de agua, esos hoyos se convierten en microhábitats para otras formas de vida. Investigadores de la Universidad de Coblenza-Landau y de otras instituciones han estudiado el contenido de una treintena de esas minicharcas en Uganda y han contabilizado al menos 61 microinvertebrados de nueve órdenes distintos que han hecho de ellas su hogar: ácaros, efímeras, remeros (notonéctidos), sanguijuelas, gasterópodos, etcétera. Y también renacuajos. Todo sea dicho, las pisadas más viejas alojan la biodiversidad más rica, probablemente a causa de la acumulación de hojas y de otros restos orgánicos que sirven de alimento. Los resultados del estudio se publicaron en línea el pasado verano en *African Journal of Ecology*.

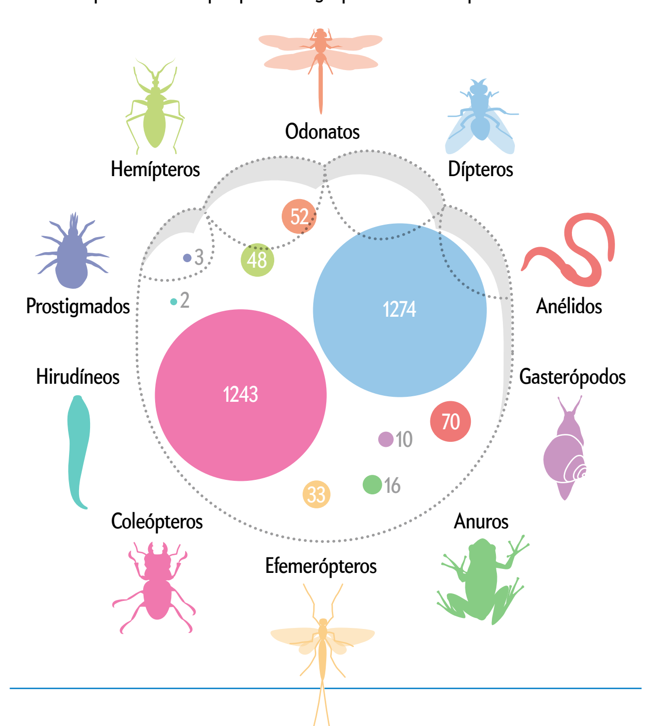
El recuento indica que las pisadas del paquidermo podrían formar parte del ciclo de vida de algunas especies y de la propia red trófica. Quién iba a imaginarse que algo tan anodino como las huellas de los elefantes podía ser fundamental para muchos otros animales, opina George Wittemyer, presidente del Comité científico de Save the Elephants, que no ha participado en el estudio. Los investigadores reconocen que el trabajo es preliminar y será preciso ahondar más en la cuestión para conocer el grado de dependencia de los diminutos moradores de esos mundos mínimos.

El estudio se suma al conjunto de investigaciones que revelan el cometido vital que el elefante desempeña en su ecosistema (como la dispersión de semillas a través de sus voluminosas deposiciones). Su autor principal, Wolfram Remmers de la Coblenza-Landau, espera que sirva de recordatorio de lo que podríamos perder si no se pone remedio a la caza furtiva en África.

—John R. Platt

Los habitantes de una pisada de paquidermo

En 30 pisadas de elefante se han hallado miles de animalillos. Los representados aquí aparecen agrupados en sus respectivos órdenes.



MORKEL ERASMUS, GETTY IMAGES (*elefante*); FUENTE: «ELEPHANT (*LOXODONTA AFRICANA*) FOOTPRINTS AS HABITAT FOR AQUATIC MACROINVERTEBRATE COMMUNITIES IN KIBALE NATIONAL PARK, SOUTH-WEST UGANDA». REMMERS ET AL. EN *AFRICAN JOURNAL OF ECOLOGY*, PUBLICADO EN LÍNEA EL 23 DE AGOSTO DE 2016; AMANDA MONTÁÑEZ (*gráfico*)



SALUD

El páncreas artificial está a punto

Los reguladores automáticos de la concentración de azúcar en la sangre son una realidad cada vez más cercana

Los que padecen diabetes de tipo 1, incapaces de producir la hormona insulina, han de vigilar sus niveles de glucosa (azúcar) en sangre. La hiperglucemia crónica, consecuencia de la carencia de insulina, provoca daños nerviosos y orgánicos; la hipoglucemia, por contra, crisis convulsivas o incluso la muerte. El tratamiento de referencia consiste en un glucómetro continuo (sensor insertado bajo la piel), una bomba de insulina (dispositivo portátil y programable que administra distintos volúmenes de insulina), y mucho ensayo y error por parte del usuario, porque el glucómetro y la bomba no están conectados. Los investigadores han estado trabajando para facilitar las cosas a los pacientes e integrar y automatizar todo el proceso. El resultado final, el páncreas artificial, es un sistema que determina casi en el acto cuánta insulina precisa el cuerpo y suministra esa cantidad automáticamente.

«El páncreas artificial nos permitirá gozar de una vida casi normal hasta que haya cura», afirma Kelly Dunkling Reilly, enfermera y educadora de la diabetes que participó en calidad de paciente en un reciente estudio clínico con el páncreas iLet de Beta Bionics, empresa con sede en Boston. «Por primera vez en mis 24 años con diabetes, he practicado ejercicio cuando he querido y he atendido a mis pacientes sin el temor constante de la hipoglucemia.» Tras más de una década de desarrollo, varios modelos de páncreas artificial han iniciado las últimas fases antes de la comercialización.

—Ellen Sheng

En junio, el fabricante de dispositivos médicos Medtronic presentó una solicitud de autorización de precomercialización ante la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. de un «sistema en bucle cerrado híbrido», una bomba de insulina que analiza los datos suministrados por un glucómetro continuo y ajusta automáticamente la dosis de insulina. El usuario aún tendría que indicar las dosis de insulina a la hora de comer. En mayo concluyó un estudio con 124 diabéticos que usaron el aparato de Medtronic, el cual demostró que el sistema es seguro y que el cálculo autónomo de las dosis es fiable.

A principios de año se puso en marcha uno de los mayores ensayos clínicos hasta la fecha, con 240 pacientes de EE.UU. y Europa. Dirigido por investigadores de las universidades de Virginia y Harvard, junto con un consorcio de organizaciones, el estudio pondrá a prueba la seguridad y la eficacia de un sistema que integra una bomba de insulina, un glucómetro continuo y un teléfono inteligente. Este último contiene un algoritmo que analiza los valores de la glucemia y envía órdenes a la bomba para que suministre la dosis adecuada de insulina. Se analizarán dos algoritmos distintos.

Beta Bionics está concibiendo un dispositivo (*abajo*) que suministre tanto insulina como glucagón, la hormona que eleva los niveles de azúcar en la sangre. Con los datos aportados continuamente por el glucómetro, su algoritmo decide la hormona que hay que suministrar y en qué cantidad. «El uso de la insulina y del glucagón refuerza el control del nivel de azúcar en la sangre», explica su presidente ejecutivo Edward Damiano. Este prevé iniciar los ensayos clínicos a mediados de 2017. Una versión provista únicamente de insulina podría recibir el visto bueno en 2018.



CORTESÍA DE BETA BIONICS, INC.

BIOLOGÍA

Tensión en la taxonomía

Los defensores del código de barras genético y los taxónomos tradicionales mantienen un enconado debate sobre el modo de catalogar la vida



Hace un par de meses, los coleópteros fueron degradados. Los biólogos pensaban desde hacía tiempo que el de los escarabajos era el orden más diverso, pero según un nuevo estudio publicado en *Philosophical Transactions of the Royal Society B,* ese honor recae ahora en las moscas y mosquitos que integran el orden de los dípteros. Este hallazgo ha disparado la tensión en los círculos de expertos en taxonomía, como parte de un debate abierto sobre el modo de definir una especie.

La nueva designación de los dípteros tuvo lugar después de que científicos de la Universidad de Guelph analizaran más de un millón de insectos con el código de barras de ADN, un método taxonómico computarizado que identifica un perfil genético a partir de un fragmento de ADN del animal. Ese perfil recibe un número índice de código de barras (BIN, por sus siglas en inglés), que representa a la especie. Con ese análisis han descubierto que una familia de dípteros tenía 16.000 BIN, lo cual multiplica por diez los cálculos anteriores. Si se extrapola a escala mundial, este hallazgo podría cambiar la visión arraigada que tenemos de la vida en la Tierra, asegura Paul D. N. Hebert, su autor principal.

Pero muchos taxónomos tradicionales discrepan de la idea de que un BIN sea equivalente a una especie. «Este artículo pone de relieve una diferencia realmente esencial sobre el modo de catalogar la biodiversidad, de tal modo que sus cifras y las nuestras a veces difieren en más de un orden de magnitud», afirma Doug Yanega, entomólogo clásico de la Universidad de California en Riverside. «Verdaderamente, supone una diferencia abismal. Es como si estuviéramos observando planetas distintos.»

Los tradicionalistas, que clasifican las especies examinando y comparando especímenes de carne y hueso, argumentan que los códigos de barras ayudan a ubicar los seres vivos en órdenes y familias, pero carecen de la resolución para clasificar a las propias especies. De hecho, los taxónomos ya han adoptado plenamente la filogenia molecular, que a menudo recurre al ADN para dilucidar las relaciones evolutivas. «El código de barras del ADN no es un sustituto de la taxonomía clásica», asegura Andrew V. Z. Brower, profesor de biología en la Universidad estatal de Middle Tennessee. «Todo lo que hace es señalar problemas para que los taxónomos puedan investigarlos.» Aun así, los defensores del código de barras (un pequeño pero influyente grupo en su ámbito) aseguran que el método es preciso y esgrimen estudios en que el número de especies determinado con dicha técnica concuerda con los recuentos anteriores. Así sucede con los coleópteros europeos. Algunos también abogan por esta técnica porque permite analizar con rapidez y economía volúmenes ingentes de ADN, lo que acelera drásticamente el conocimiento sobre la biodiversidad en una época en que la actividad humana está poniendo en peligro inminente a especies desconocidas. «No podemos permitirnos el lujo de esperar [a que la taxonomía clásica acabe el trabajo]. Corremos el grave riesgo de quemar el libro de la vida antes de haberlo leído», advierte Hebert.

> «Es como si estuviéramos observando planetas distintos.» *—Doug Yanega, Universidad de California en Riverside*

El consenso general es que el código de barras genético ha suscitado preguntas legítimas. Pero muchos taxónomos se niegan a equiparar los BIN con las especies hasta que la técnica no se haya refinado. «Es una herramienta potente para obtener una visión general de la biodiversidad, pero cuando uno considera que cada código de barras equivale a una especie, surgen problemas. Aún es un nuevo mundo por descubrir», opina Dee Ann Reeder, bióloga de la Universidad Bucknell. Por ahora, tal vez lo único cierto en todo este debate sea la extinción y los taxones.

—Kat Long

THOMAS FUCHS (*código de barras*); INSTITUTO CATALÁN DE PALEOECOLOGÍA HUMANA Y EVOLUCIÓN SOCIAL (*gorilas*)

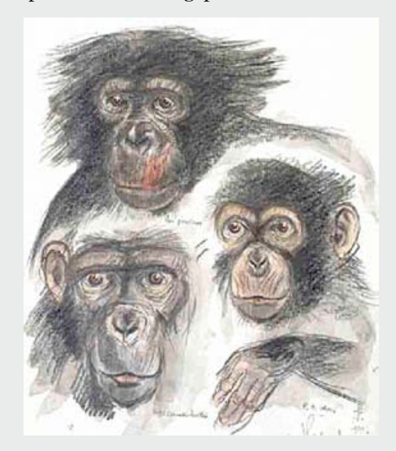
AGENDA

CONFERENCIAS

16 y 17 de noviembre — Simposio
Los orígenes de la vida y su búsqueda en el universo
Fundación Ramón Areces, Madrid
www.fundacionareces.es > agenda

EXPOSICIONES

Hasta el 20 de noviembre
Jordi Sabater Pi: Una vida dedicada a la ciencia
Instituto Catalán de Paleoecología Humana y Evolución Social (IPHES)
Espluga de Francolí
iphes-noticies.blogspot.de



Hasta el 27 de noviembre
Prehistoria y cómic
Museo de Prehistoria de Valencia
www.museuprehistoriavalencia.es

OTROS

4 y 5 de noviembre — Festival científico
State of emotion: The sentimental machine
Jornadas interdisciplinares sobre emociones humanas e inteligencia artificial
STATE Festival Foundation
Kühlhaus, Berlín
www.statefestival.org

Del 7 al 20 de noviembre
Semana de la Ciencia 2016
Numerosas actividades de divulgación en todo el territorio nacional

9 y 23 de noviembre — Talleres
Matemáticas en acción
Modelización de epidemias (9/11)
y suministro de aguas (23/11)
Universidad de Cantabria, Santander
web.unican.es/centros/ciencias

30 de noviembre — Ciencia ciudadana
The BIG Bell Test
Experimento en línea de física cuántica
Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO)
thebigbelltest.org

COMPLEJIDAD

La unificación de los modelos de espín

Una familia de modelos simples, concebidos originalmente para estudiar el magnetismo, permite simular un número infinito de modelos más complejos con aplicaciones en física, biología y teoría de la información

GEMMA DE LAS CUEVAS

El mundo macroscópico que nos rodea —la sociedad, la biosfera, el cerebro, los materiales— es complejo. Una manera de entender dicha complejidad consiste en formular modelos microscópicos simples que, a escala macroscópica, exhiban algunos de los comportamientos que deseamos analizar. En un gran número de casos esto puede lograrse mediante los llamados «modelos de espín»: modelos en los que el sistema queda descrito por un conjunto de constituyentes interconectados, cada uno de los cuales puede adoptar uno de dos o más estados internos. En los últimos años, tales modelos se han empleado con gran éxito en física de materiales, biología, neurociencia y teoría de la información.

En un trabajo cuyos resultados aparecieron publicados el pasado mes de marzo en la revista *Science*, Toby S. Cubitt, del Colegio Universitario de Londres, y la autora de este artículo demostramos que todos los modelos de espín posibles pueden reducirse a uno solo. Nuestro estudio guarda relación con la teoría de la complejidad computacional y abre la puerta a obtener resultados analíticos, numéricos y experimentales de numerosos sistemas hasta ahora intratables.

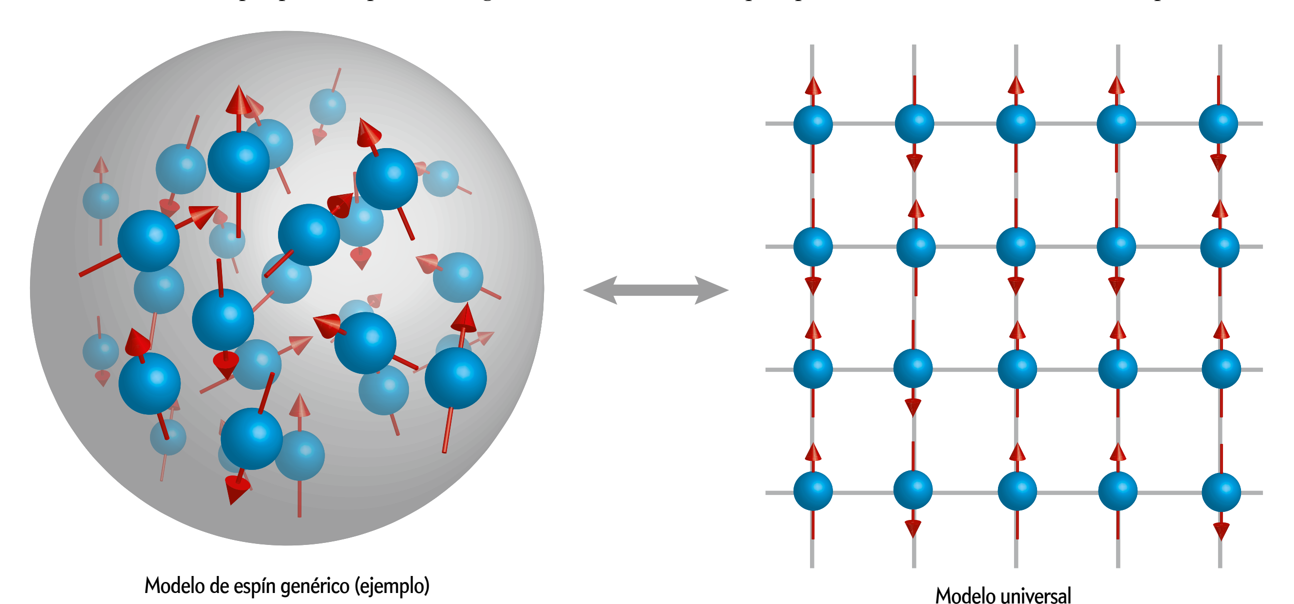
Uno de los modelos de espín más célebres es el de Ising, estudiado en 1924 por el físico alemán Ernst Ising para describir los materiales ferromagnéticos. Se trata de un modelo extremadamente simplificado del material que, sin embargo, reviste gran interés porque exhibe una transición de fase: un comportamiento similar al que se produce cuando el agua hierve o se congela. En el caso del modelo de Ising, dicha transición tiene lugar entre la fase ferromagnética, o imantada, y la desordenada, o sin imantación.

De todas las propiedades del material, el modelo de Ising solo describe el momento magnético, o espín, del último electrón de cada átomo. Esta variable puede imaginarse como una flecha que apunta en uno de dos sentidos: hacia arriba o hacia abajo. Por lo demás, cada espín solo puede influir en el estado de sus vecinos más próximos (haciendo que estos tiendan a orientarse en su mismo sentido o en el opuesto), pero no en los demás.

A pesar de su gran simplicidad, el modelo de Ising ha sido estudiado durante años con gran detalle y ha ayudado a esclarecer numerosos aspectos del magnetismo. La lección que cabe extraer es que modelos muy simples a escala microscópica pueden exhibir una gran riqueza de comportamientos desde el punto de vista macroscópico. Los resultados de nuestro trabajo llevan esta conclusión un paso más allá.

Modelos simples, comportamiento complejo

El éxito del modelo de Ising hizo que, con los años, el estudio de los modelos de espín adquiriese un estatus independiente como herramienta para describir



EL COMPORTAMIENTO MACROSCÓPICO de numerosos sistemas físicos y biológicos puede reproducirse mediante los llamados «modelos de espín» (*izquierda*); en ellos, el sistema queda descrito a nivel microscópico por un conjunto de constituyentes elementales, cada uno de los cuales puede adoptar uno de varios estados internos (*flechas*). Un trabajo reciente ha demostrado que, con independencia de su dimensión, número de estados internos o tipo de interacciones entre constituyentes, las propiedades de cualquier modelo de espín pueden obtenerse a partir de cierto modelo simple en dos dimensiones (*derecha*).

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

sistemas complejos. La idea consiste en considerar un conjunto de variables que pueden adoptar varios estados internos (dos en el caso del modelo de Ising, pero más en general) y que se encuentran conectadas entre sí, de forma que hay un «coste» asociado a cada configuración posible de variables. El reto suele consistir en averiguar cuál es la configuración que minimiza dicho coste; es decir, la de mínima energía.

Dicho planteamiento es muy versátil y puede aplicarse a una gran variedad de situaciones. El modelo de Ising se ha empleado para describir gases y estudiar con ello la transición de fase líquido-gas (donde los estados «arriba» y «abajo» significan ahora si una molécula se encuentra o no en un punto dado), para modelizar aleaciones (donde los estados simbolizan si un átomo es de un elemento o de otro) o incluso como modelo de materia en algunas teorías de gravedad cuántica (donde el estado representa si hay materia o no en un punto del espacio). Más allá de la física, algunas generalizaciones del modelo de Ising se han usado para estudiar la evolución prebiótica, el plegamiento de proteínas o las redes neuronales, lo que a su vez ha dado lugar a modelos de la memoria o de reconocimiento de patrones.

Los modelos de espín también guardan un estrecho vínculo con la teoría de la información, donde se usan para modelizar códigos de corrección de errores o de restauración de imágenes, y también con los problemas de optimización, ya que la minimización de la energía puede reinterpretarse con facilidad como la optimización de otra cantidad. Todas estas conexiones han permitido exportar numerosas técnicas de física estadística a otros campos, y viceversa.

Modelos universales

Desde hace décadas, se sabe que los distintos modelos de espín se organizan en familias llamadas «clases de universalidad», cada una de las cuales queda determinada por el comportamiento del modelo cerca de una transición de fase [*véase* «Problemas físicos con muchas escalas de longitud», por Kenneth Wilson, Investigación y Ciencia, octubre de 1979; *reeditado para* «Grandes ideas de la física», colección Temas de IyC n.º 80, 2015]. Por ejemplo, el modelo de Ising, dependiendo de si está definido en un espacio de dos, tres o cuatro dimensiones, pertenece a una familia o a otra. Cada clase queda determinada por características muy genéricas del modelo, como la dimensionalidad del espacio en el que está definido o el número de estados internos de cada variable. Hasta ahora, sin embargo, se pensaba que cada familia era independiente del resto.

En nuestro trabajo hemos demostrado que el comportamiento de todas las familias puede obtenerse a partir de un modelo de Ising en dos dimensiones con campos magnéticos. En otras palabras: dicho modelo puede simular la física de cualquier otro, donde «simular» significa reproducir todos los niveles de energía, las configuraciones de espines asociadas a cada nivel, así como la «función de partición», una cantidad fundamental en mecánica estadística a partir de la cual pueden calcularse las propiedades termodinámicas del sistema.

Para ello, la clave consiste en considerar un modelo de Ising con constantes de acoplamiento inhomogéneas (es decir, en el que cada espín interacciona con sus vecinos con mayor o menor intensidad) y, en general, con más espines de los que contiene el modelo que nos proponemos simular. Ello permite que este sistema reproduzca el comportamiento de otros modelos mucho más exóticos, como aquellos definidos en un espacio de más dimensiones o con interacciones y simetrías más complejas.

En este sentido, decimos que el modelo de Ising en dos dimensiones con campos magnéticos es «universal», dada su capacidad para simular todos los demás. De hecho, hemos demostrado que existen otros muchos modelos universales. Lo sorprendente no solo ha sido ver que hay modelos universales, sino comprobar que los haya tan simples.

Al mismo tiempo, nuestro trabajo nos ha permitido caracterizar por completo qué propiedades hacen que un modelo sea universal. Para ello hemos empleado herramientas de la teoría de la complejidad computacional, una rama de la informática teórica.

Universalidad y computación

En el mundo de la computación, la idea de que una máquina sea capaz de calcular cualquier cantidad que pueda obtenerse en un número finito de pasos fue concebida en los años treinta del siglo pasado por Alan Turing [*véase* «Máquinas de Turing», por John E. Hopcroft, Investigación y Ciencia, julio de 1984; *reeditado para* «La ciencia después de Alan Turing», colección Temas de IyC n.º 68, 2012]. La «máquina universal de Turing» es un dispositivo reprogramable; es decir, capaz de ejecutar cualquier algoritmo. Los modelos de espín universales resultan similares a una máquina universal de Turing, ya que pueden comportarse como cualquier otro modelo.

En el caso de las máquinas de Turing, hace tiempo que se sabe que algunos dispositivos aparentemente muy simples, con reglas muy sencillas para transformar la información, pueden ser universales, y que esta propiedad es de hecho muy común. Esta es la misma lección que hemos aprendido con los modelos de espín: algunos sistemas muy sencillos, como el de Ising, son universales, ya que pueden encapsular toda la complejidad contenida en otros sistemas.

Nuestro resultado puede permitir estudiar sistemas complejos desde el punto de vista analítico (mediante cálculos matemáticos explícitos), numérico (simularlo con ordenadores) o experimental (simularlos en el laboratorio) que antes estaban fuera de alcance, con aplicaciones en varios de los campos mencionados arriba. Aún queda un largo camino por delante, puesto que, en la práctica, primero es necesario encontrar formas optimizadas de simular el sistema de interés con el modelo de Ising. Pero, al menos, ya sabemos que este los contiene a todos.

—Gemma de las Cuevas
Instituto de Física Teórica
Universidad de Innsbruck

PARA SABER MÁS

The two-dimensional Ising model. Barry M. McCoy y Tai Tsun Wu. Dover, 2014.

Simple universal models capture all classical spin physics. Gemma de las Cuevas y Toby S. Cubitt en *Science*, vol. 351, pág. 1180-1183, marzo de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Líquidos y hielos de espín. Rafik Ballou y Claudine Lacroix en *IyC*, abril de 2009.

Un nuevo pilar para la física estadística. Daniel Meyer y Dierk Schleicher en *IyC*, marzo de 2012.

Leyes universales. Terence Tao en *IyC*, febrero de 2015.

CÁNCER

La acción de un veterano fármaco contra el cáncer

El 5'-fluorouracilo, uno de los compuestos más empleados en quimioterapia, debe parte de su efecto a la capacidad de alterar la organización y segregación de los cromosomas

LAURA MOJARDÍN MENÉNDEZ

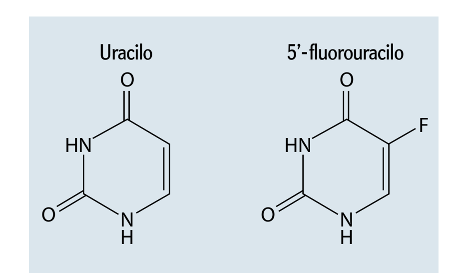
Quimioterapia es un término acuñado por el médico alemán Paul Ehrlich a principios del siglo xx para referirse al empleo de compuestos químicos en el tratamiento de enfermedades. El método ha resultado muy eficaz en numerosos tipos de cáncer y ha permitido aumentar las expectativas de vida de muchos pacientes.

Uno de los fármacos más ampliamente utilizados hoy en quimioterapia es el 5'-fluorouracilo (5FU), que detiene la división celular incontrolada propia de los tumores. A pesar de haberse comprobado que ejerce ese efecto, no se conoce por completo su mecanismo de acción. Se sabe que interfiere principalmente en la síntesis del ADN y, como consecuencia, frena el crecimiento tumoral. Sin embargo, no se han descrito todos los procesos celulares a los que afecta. Tal conocimiento resulta esencial para diseñar estrategias terapéuticas más específicas contra los distintos tipos de cáncer y para que más pacientes puedan beneficiarse de ellas. Nuestro grupo del Centro de Biología Molecular Severo Ochoa de Madrid, dirigido por Margarita Salas, ha descubierto un nuevo modo de acción del 5FU. En concreto, hemos demostrado que, inhibe la división celular al provocar anomalías en la organización y segregación de los cromosomas.

El descubrimiento del 5FU

Resulta especialmente curioso que la quimioterapia moderna tenga sus orígenes en los campos de batalla de la Primera Guerra Mundial. En concreto, en las investigaciones que el ejército estadounidense llevaba a cabo para el desarrollo y la contención de agentes químicos de uso militar, como el gas mostaza. En este contexto se observó que los soldados que habían estado expuestos al gas presentaban una disminución global en los niveles de glóbulos blancos y de células de la médula ósea. Los médicos se dieron cuenta enseguida del posible potencial terapéutico de esta sustancia para tratar los linfomas (un tipo de cáncer que afecta al sistema inmunitario). De esta manera, se puso en marcha el primer ensayo de quimioterapia de la historia, lo que supondría un punto de inflexión en la búsqueda y el estudio de compuestos para combatir el cáncer.

Otro hito en la lucha contra el cáncer tuvo lugar en 1955, cuando Charles Heidelberger y sus colaboradores en la Universidad de Wisconsin identificaron una característica bioquímica singular del metabolismo del tumor hepático de rata: las células cancerosas presentaban unos mayores requisitos de uracilo (una de las cuatro bases nitrogenadas que forman parte del ácido ribonucleico, ARN) que sus vecinas en los tejidos sanos. Basándose en esta observación, sintetizaron el compuesto 5FU, en el que un átomo de flúor sustituye al hidrógeno en la posición 5' del uracilo. El resultado es una sustancia que la célula confunde con el uracilo pero que le resulta tóxica, ya que interfiere con determinados procesos biológicos.



Desde el descubrimiento de sus propiedades antineoplásicas, el 5FU se ha convertido en uno de los fármacos más empleados para tratar diversos tipos de cáncer, como el esofágico, el gástrico, el de mama, el de páncreas o el de cabeza y cuello, aunque es en el colorrectal donde mayor impacto ha tenido su uso. Se estima que cada año unos dos millones de pacientes reciben quimioterapia con 5FU en todo el mundo. Muchos de ellos se engloban dentro del millón de personas que anualmente son diagnosticadas con cáncer colorrectal, una enfermedad que se sitúa como la cuarta causa de mortalidad por cáncer, según datos del Fondo Mundial para la Investigación sobre el Cáncer. Estas cifras dan una idea de la urgencia de hallar terapias más eficaces que mejoren la calidad y las expectativas de vida de los pacientes, en especial de los que no responden a los tratamientos tradicionales o de los que han desarrollado resistencia a estos.

Los efectos del 5FU se han asociado tanto a su capacidad para inhibir la timidilato sintasa (una enzima que participa en la síntesis del ADN) como para incorporarse a los ácidos nucleicos y alterar así su metabolismo. En la actualidad, un número creciente de pruebas apuntan a que la principal diana de este fármaco son las rutas de procesamiento del ARN. Sin embargo, se hacen necesarios nuevos estudios que ahonden en el conocimiento del modo de acción del 5FU con el fin de diseñar estrategias que mejoren la efectividad de los tratamientos, así como para proponer nuevas combinaciones de agentes quimioterapéuticos.

La acción del fármaco en levaduras

Con ese propósito, nuestro grupo examinó los genes implicados en la respuesta al 5FU. Utilizamos la levadura de fisión (*Schizosaccharomyces pombe*) como modelo de estudio. El empleo de este microorganismo se debe al alto grado de conservación de numerosas rutas metabólicas de las levaduras con sus homólogas en mamíferos, a la facilidad de su cultivo, a su rápida tasa de división celular y a la disponibilidad de técnicas muy eficaces para su manipulación genética y para el análisis genómico de sus funciones biológicas (las levaduras son herramientas muy valiosas para la investigación de compuestos con relevancia clínica).

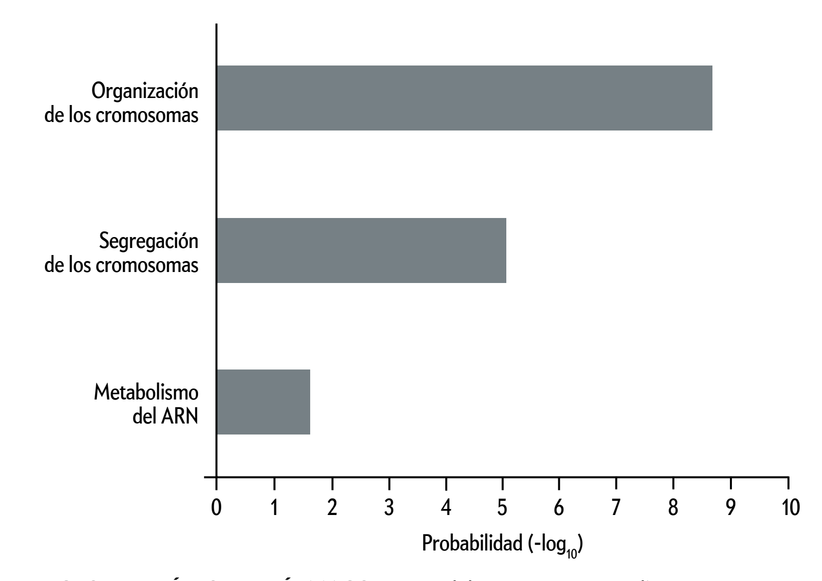
Nuestro enfoque consistió en examinar un conjunto de mutantes de la levadura de fisión para identificar genes cuya deleción confiriera vulnerabilidad al 5FU. Este ensayo validó dianas previamente

caracterizadas del fármaco, como el metabolismo del ARN, pero también reveló un inesperado mecanismo de acción asociado a la segregación y organización de los cromosomas. En este último grupo también se incluye la dinámica de la heterocromatina, un tipo de cromatina (conjunto de ADN y proteínas) altamente condensada con una baja proporción de genes y cuya transcripción suele estar inhibida; además, la heterocromatina contribuye a funciones biológicas tan importantes como la segregación de los cromosomas o la división celular.

El análisis de los genes implicados en la respuesta al 5FU reveló que tal sustancia interfería en los procesos que regulan la estructura y la función de la heterocromatina. El hallazgo podría tener una relevancia clínica considerable, puesto que en los últimos años se ha puesto de manifiesto una organización anómala de la heterocromatina en numerosos tipos de cáncer. Por este motivo, un tratamiento con 5FU podría provocar de modo preferente la muerte de las células tumorales que presenten esos defectos.

Asimismo, determinados factores encargados de las modificaciones de histonas (las proteínas responsables del empaquetamiento del ADN) se hallan con frecuencia mutados en diversos tumores. En este sentido, cabe destacar que algunos estudios muestran la posibilidad de predecir la respuesta de un paciente con cáncer de páncreas a la quimioterapia combinada con 5FU según las modificaciones de las histonas que presente.

Nuestro estudio reveló también que, después de un tratamiento con 5FU, las células presentaban defectos en la segregación de los cromosomas. Tales defectos podrían estar relacionados con la activación de genes implicados en los procesos de división celular y con la presencia de una heterocromatina anómala en el centrómero (región responsable de realizar y regular los movimientos cromosómicos durante la división celular).



EL EFECTO DELETÉREO DEL FÁRMACO 5FU se debe a que actúa en diversos procesos celulares, según se ha observado en la levadura de fisión. Además de interferir en el metabolismo del ARN, afecta también a los genes implicados en la organización y segregación de los cromosomas. La longitud de las barras expresa la probabilidad (en logaritmo negativo) de que el 5FU intervenga en un proceso celular dado.

Nuevas terapias más eficaces

Otro resultado interesante fue observar que el tiabendazol (TBZ), un compuesto desestabilizador de los microtúbulos (estructuras que intervienen en el transporte celular), potenciaba los efectos tóxicos del 5FU. La combinación de ambos compuestos podría ofrecer buenos resultados en el tratamiento del cáncer. De hecho, el tiabendazol se ha revelado como un candidato prometedor por su capacidad para ralentizar el crecimiento de tumores sólidos. Ello se debe a que actúa sobre los microtúbulos de los vasos sanguíneos colindantes a los tumores e impide así el correcto flujo de nutrientes hacia las células cancerosas. De manera similar, se ha descrito que otros fármacos que alteran los microtúbulos, como las criptoficinas, el docetaxel y la epotilona D, aumentan los efectos tóxicos del 5FU en cultivos de células humanas.

El empleo de varias sustancias anticancerígenas pretende disminuir la dosis individual de cada una de ellas por separado, así como aumentar la potencia terapéutica del conjunto. Este método ha resultado muy eficaz en la lucha contra determinados tipos de tumores, incluidos los que se tratan con un programa basado en 5FU. En concreto, la administración combinada de 5FU con otros dos fármacos antitumorales, el irinotecano y el oxaliplatino, ha mejorado en casi un 50 por ciento la respuesta de los pacientes con cáncer colorrectal avanzado.

Teniendo en cuenta que las propiedades estructurales y funcionales de los centrómeros están conservadas a lo largo de la evolución de los eucariotas, es posible que los defectos observados en estas regiones de la levadura de fisión sean extrapolables a los humanos. En ambos organismos, los centrómeros están compuestos por secuencias de ADN repetitivas, las cuales se asocian a histonas con modificaciones específicas y a proteínas que actúan en la formación de heterocromatina o en la función centromérica. Es razonable pensar, pues, que el 5FU altere también la estructura y la transcripción de la heterocromatina en los humanos.

La mayor parte de los estudios llevados a cabo hasta la fecha con fármacos anticancerígenos se han centrado en la identificación de las proteínas celulares sobre los que estos actúan, un conocimiento que puede ayudar a mejorar la eficacia de la quimioterapia. El descubrimiento de que el 5FU interviene sobre la organización de los cromosomas resulta especialmente relevante, ya que permite pensar que los efectos de un compuesto antitumoral en la cromatina pueden por sí mismos generar daño celular que pudiera desembocar en la muerte de la célula cancerosa. Una hipótesis a tener en cuenta en los ensayos clínicos venideros.

—Laura Mojardín Menéndez
Dpto. de dinámica y función del genoma
Centro de Biología Molecular Severo Ochoa, Madrid

PARA SABER MÁS

5'-fluorouracil: mechanisms of action and clinical strategies. D. B. Longley, D. P. Harkin y P. G. Johnston en *Nature Reviews Cancer*, vol. 3, págs. 330-338. 2003.

Chromosome segregation and organization are targets of 5'-fluorouracil in eukaryotic cells. L. Mojardin et al. en *Cell Cycle*, vol. 14, págs. 206-218, 2015.

BIOFÍSICA

Desplegar el cerebro

Nuevos experimentos con geles expansivos han reavivado la idea de que la formación de circunvoluciones en el cerebro humano está modulada por fuerzas físicas, y no solo por procesos genéticos, biológicos o químicos

ELLEN KUHL

Hace cuatro décadas, un grupo de Harvard propuso un modelo físico de crecimiento diferencial para explicar la formación de pliegues durante el desarrollo del cerebro humano. Aquel modelo desató controversia, pues ponía en entredicho la creencia generalizada de que la morfogénesis superficial, la emergencia de patrones y la evolución de la forma del cerebro eran procesos puramente biológicos. Ahora, en un artículo publicado en *Nature Physics*, Tuomas Tallinen y sus colaboradores, también de Harvard, han aportado la primera prueba empírica sobre la teoría del crecimiento diferencial y han demostrado que las fuerzas físicas, y no solo los procesos bioquímicos, desempeñan un papel clave en el desarrollo del sistema nervioso. El hallazgo reviste un gran potencial para el diagnóstico, tratamiento y prevención de una amplia variedad de trastornos neurológicos.

En promedio, un cerebro humano adulto presenta un volumen de 1200 centímetros cúbicos, una superficie de 2000 centímetros cuadrados y un grosor cortical de 2,5 milímetros. Se calcula que nuestro órgano contiene unos 100.000 millones de neuronas, 20.000 millones de las cuales se hallan en su capa más externa, la corteza cerebral. Cada neurona cortical está conectada a otras 7000 neuronas, lo que da lugar a 150 billones de conexiones y a más de 150.000 kilómetros de fibras nerviosas.

La girificación, el proceso por el que se produce el plegamiento cortical, parece ser un mecanismo clave que maximiza el número de neuronas de la corteza y minimiza la distancia entre ellas. En los humanos, comienza hacia la semana 23 de gestación. El cerebro continúa después creciendo hasta la edad adulta (unas 20 veces en volumen y 30 en superficie), pero el grosor de la corteza apenas varía. Sin embargo, el plegamiento puede ir mal: una disminución o un aumento apreciables en el número de circunvoluciones (anomalías conocidas como lisencefalia y polimicrogiria, respectivamente) suelen ir asociados a trastornos graves, como convulsiones, disfunciones motoras, retraso mental o del desarrollo. Con el fin de abordar los secretos biológicos del desarrollo cerebral, los expertos han considerado teorías filogenéticas, neurogenéticas y bioquímicas. Hasta la fecha, sin embargo, los mecanismos responsables del plegamiento cortical han permanecido ocultos.

Inspirado en la física de la materia blanda, el modelo de crecimiento diferencial propuesto hace ahora cuarenta años ha vuelto a captar la atención de los expertos. Dicho modelo contempla el neurodesarrollo como un problema de inestabilidad física en un proceso de crecimiento constreñido, y explica el plegamiento cortical como un mecanismo de liberación de presiones residuales mediante el pandeo de la superficie. Predice que la «longitud de onda» de los giros (la distancia característica entre dos surcos) es proporcional al grosor cortical y también a la raíz cúbica del cociente entre la rigidez de la capa exterior del cerebro y la del núcleo interior. Dado que la capa cortical es extremadamente fina y muy blanda, una alteración en cualquiera de los parámetros puede inducir cambios notables en las circunvoluciones.

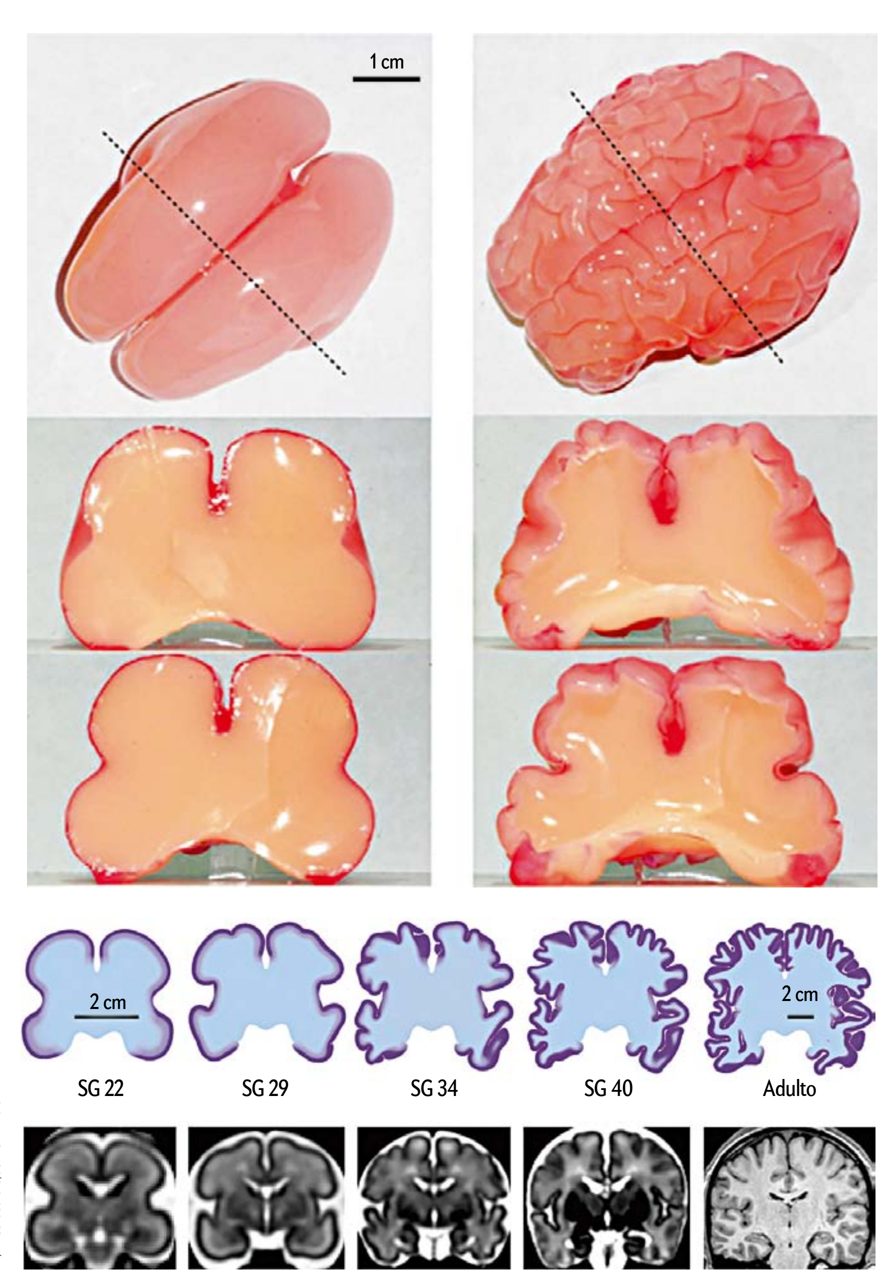
A pesar de que dicho modelo aporta una explicación muy intuitiva para un físico —de hecho, es de aplicación universal en geofísica, diseño de materiales inteligentes y circuitos flexibles—, la teoría ha recibido críticas por parte de la comunidad neurocientífica debido a la falta de datos empíricos que la sustenten. Se trata de un reproche legítimo, pero también difícil de resolver: experimentar con encéfalos humanos es éticamente cuestionable; hacerlo con roedores puede dar lugar a resultados equívocos, ya que en la mayoría de los casos su cerebro no se pliega; y los ensayos con sucedáneos que remedan el cerebro se enfrentan a la dificultad de que los materiales artificiales no crecen.

Cerebro fetal, geles y simulaciones

Gracias a una astuta serie de experimentos con geles expansivos, Tallinen y sus colaboradores han demostrado que las inestabilidades físicas inducidas por la expansión pueden provocar el plegamiento cortical. A partir de imágenes de resonancia magnética del cerebro no plegado de un feto humano de 22 semanas, los investigadores imprimieron un molde tridimensional de polímero. Después, crearon una «horma negativa» con silicona y, con un elastómero blando, fabricaron un prototipo del núcleo interior de materia blanca. Mediante un depósito por goteo, cubrieron la estructura con una capa de gel expansivo, la cual representaba la materia gris. Al sumergirla en un disolvente, la capa exterior se hinchaba con respecto al núcleo interior, generando presiones residuales y plegándose hasta alcanzar una forma sorprendentemente similar a un cerebro humano.

Los resultados experimentales guardan perfecta consonancia con el modelo matemático. Con todo, este solo puede predecir la evolución de estructuras simples y regulares al principio del plegamiento. Más allá del primer punto de inestabilidad, una poderosa herramienta para calcular los pliegues inducidos por el crecimiento de un sistema biológico real es el «análisis de elementos finitos». Esta técnica consiste en dividir el cerebro en miles de fragmentos simples y regulares (los elementos finitos) y permitir que cada uno de ellos crezca. Los elementos interiores lo hacen en volumen y los exteriores en superficie, pero no en grosor. El crecimiento de la superficie induce presiones corticales y, una vez que estas alcanzan cierto valor crítico —similar al observado en el experimento— el cerebro comienza a plegarse.

Sin embargo, simular la aparición de múltiples surcos supone todo un reto por varias razones: las ecuaciones que gobiernan el proceso son altamente no lineales; durante el plegamiento, el cerebro sufre grandes transformaciones; los surcos hacen contacto e interaccionan entre sí; y la solución presenta numerosos puntos críticos. Para sortear todas estas dificultades, Tallinen y sus colaboradores emplearon un método ingenioso y elegante: ejecutar la simulación hacia atrás y «desplegar el



UNA INGENIOSA combinación de experimentos y simulaciones ha permitido poner a prueba un modelo físico concebido hace cuarenta años para explicar la formación de pliegues corticales. Aquí se muestran varias secciones del prototipo de gel empleado en el experimento (*arriba*), de la simulación correspondiente (*centro*), así como imágenes de resonancia magnética del cerebro de un feto humano (*abajo*) en diferentes semanas de gestación (SG).

DE: «ON THE GROWTH AND FORM OF CORTICAL CONVOLUTIONS», T. TALLINEN ET AL. EN *NATURE PHYSICS*, VOL. 12, PÁGS. 588-593, JUNIO DE 2016.

cerebro». Sus resultados explican por qué el plegamiento comienza siempre en las regiones con poca curvatura y por qué los giros y los surcos cerebrales se alinean en la dirección perpendicular a la de máxima compresión.

Del modelo a la clínica

Los trabajos con prototipos expansivos del cerebro proporcionan el puente que faltaba entre la modelización, las simulaciones y el experimento. Con todo, aún persisten algunas limitaciones: el modelo matemático es simple, pero se circunscribe al plegamiento inicial de estructuras idealizadas; el experimento resulta útil para explorar las inestabilidades más allá del comienzo del plegamiento, pero solo permite estudiar cambios moderados de volumen; por último, las simulaciones permiten abordar tales problemas, pero no tienen en cuenta el papel del cráneo. En este sentido, incluir el cráneo, las meninges y los ventrículos cerebrales debería contribuir a mejorar el potencial predictivo de este enfoque.

Ahora que disponemos de una teoría física para identificar los elementos que regulan la emergencia de patrones en el cerebro, ¿qué podemos hacer con ella? Un paso lógico consistiría en correlacionar el crecimiento en superficie y volumen con los responsables moleculares y celulares de la división, migración y conectividad neuronales, así como reemplazar los ritmos de crecimiento fenomenológicos del modelo por constantes temporales extraídas de las etapas del neurodesarrollo.

De manera sorprendente, la teoría actual ya predice la forma, el tamaño, la localización y la orientación de los giros y los surcos. También explica el «índice de girificación», un parámetro que mide la magnitud de las circunvoluciones y que resulta de gran importancia para trasladar estos conocimientos a la clínica. Las imágenes por resonancia magnética funcional permiten correlacionar zona y función, lo que a su vez puede usarse para asociar el aprendizaje de capacidades motoras o lingüísticas concretas con cambios en la morfología superficial del cerebro. Trazar tales conexiones podría ayudar a identificar marcadores topológicos para el diagnóstico temprano del autismo, la esquizofrenia o el alzhéimer, así como a concebir estrategias de tratamiento más eficaces.

—Ellen Kuhl
Departamento de bioingeniería e ingeniería mecánica
Universidad Stanford

Artículo original publicado en *Nature Physics*, vol. 12, págs. 533-534, 2016.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2016

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Mechanical model of brain convolutional development. D. P. Richman et al. en *Science*, vol. 189, págs. 18-21, julio de 1975.
Mechanics of the brain: Perspectives, challenges, and opportunities. A. Goriely et al. en *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, vol. 14, págs. 931-965, octubre de 2015.
On the growth and form of cortical convolutions. T. Tallinen et al. en *Nature Physics*, vol. 12, págs. 588-593, junio de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Morfología del cerebro. Claus C. Hilgetag y Helen Barbas en *IyC*, abril de 2009.

SALUD

Cada vez más obesos

El mundo está entrando en una nueva era de obesidad grave

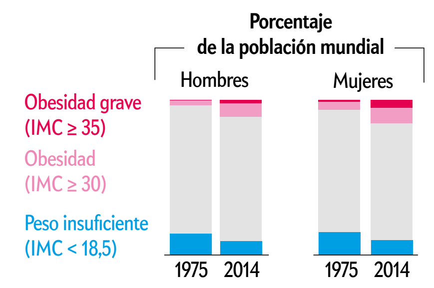
MARK FISCHETTI

Los habitantes de numerosos países en vías de desarrollo, como Liberia y Georgia, están aumentando de peso a un ritmo acelerado; lo han hecho más rápidamente desde 2000 de lo que lo hicieron entre 1975 y 2000 (*iconos rosas*). Y aunque desde 2000 el aumento de peso en muchos países desarrollados ha sido más lento de lo que era antes (*iconos naranjas*), este ha seguido subiendo. Consideradas en conjunto, las dos tendencias significan que en gran parte del mundo, estamos pasando de una era de obesidad a una era de obesidad grave, comenta Majid Ezzati, investigador principal de un gran estudio de 200 países publicado recientemente en la revista *Lancet*. Según él, los expertos están sorprendidos por el alcance de la obesidad grave (*gráfico de barras*). Si la tendencia se mantiene, se hará casi imposible alcanzar los objetivos de la Organización Mundial de la Salud de frenar el aumento de obesidad y diabetes para 2025.

La población ha engordado

Entre 1975 y 2014 la proporción de hombres y mujeres obesos (*rosa*) o gravemente obesos (*rojo*) aumentó de manera notable. La buena noticia es que la prevalencia de personas con peso insuficiente disminuyó (*azul*). Un índice de masa corporal (IMC) de 18,5 a 25 se considera saludable. (El gris representa la proporción de personas con peso saludable o sobrepeso.)

IMC = peso en kilogramos/cuadrado de la altura en metros



Ritmo al que ganamos peso

El peso medio ha aumentado desde el año 2000 en la mayor parte de los países (*por encima del eje horizontal*) y ha disminuido en unos pocos (*por debajo de dicho eje*)

■ Hombres ● Mujeres

Cambio en el IMC 2000–2014 (por década)

Cambio en el IMC 1975–2000 (por década)

2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0
−0,5
−1,0

−0,5
0,5
1,0
1,5
2,0

El IMC aumentó más rápidamente después de 2000 que antes

El IMC aumentó más lentamente después de 2000 que antes

El IMC descendió más rápidamente después de 2000 que antes

El IMC aumentó antes de 2000, pero disminuyó después de 2000

La población sobre esta línea, como los hombres de Estados Unidos, engordó a un ritmo constante de 1975 a 2014

Las mujeres de Bélgica (*rosa*) y Dinamarca (*naranja*) mantuvieron un IMC constante durante casi 40 años

Santa Lucía
Santa Lucía
Guinea Ecuatorial
Honduras
Liberia
Guinea Ecuatorial
Jamaica
Georgia
EE.UU.
Liberia
Mundo
España
Canadá
Niue
Tokelau
Islas Cook
Finlandia
España
Japón
Bahréin
Palaos
Bahréin
Nauru
Samoa Estadounidense
Nauru

FUENTE: «TRENDS IN ADULT BODY-MASS INDEX IN 200 COUNTRIES FROM 1975 TO 2014: A POOLED ANALYSIS OF 1698 POPULATION-BASED MEASUREMENT STUDIES WITH 19.2 MILLION PARTICIPANTS», COLABORACIÓN NCD DE LOS FACTORES DE RIESGO, EN *LANCET*, VOL. 387, 2 DE ABRIL DE 2016; COLABORACIÓN NCD DE LOS FACTORES DE RIESGO *www.ncdrisc.org* (*datos*); JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*)

EL EXPERIMENTO



4

¿RESISTIRÁ LA SOCIEDAD CIVIL LAS DIVERGENCIAS ECONÓMICAS?

PÁGINA 40

5

¿CONTROLAREMOS NUESTRO DESTINO GENÉTICO?

PÁGINA 52

6

¿VENCEREMOS AL ENVEJECIMIENTO?

PÁGINA 60

BRYAN CHRISTIE

1

¿QUÉ HUELLAS DEJAREMOS EN EL PLANETA?

PÁGINA 22

2

¿CÓMO NOS CAMBIARÁ EL CALENTAMIENTO?

PÁGINA 30

3

¿QUIÉN PROGRESARÁ Y QUIÉN SE QUEDARÁ ATRÁS?

PÁGINA 34



Los humanos estamos transformando el mundo y, con ello, nuestra propia especie. Nueve cuestiones clave tratan de averiguar cómo afectarán estos cambios a nuestro futuro

7

¿CUÁL SERÁ NUESTRO FUTURO COMO ESPECIE?

PÁGINA 70

8

¿ES DESEABLE LA INMORTALIDAD?

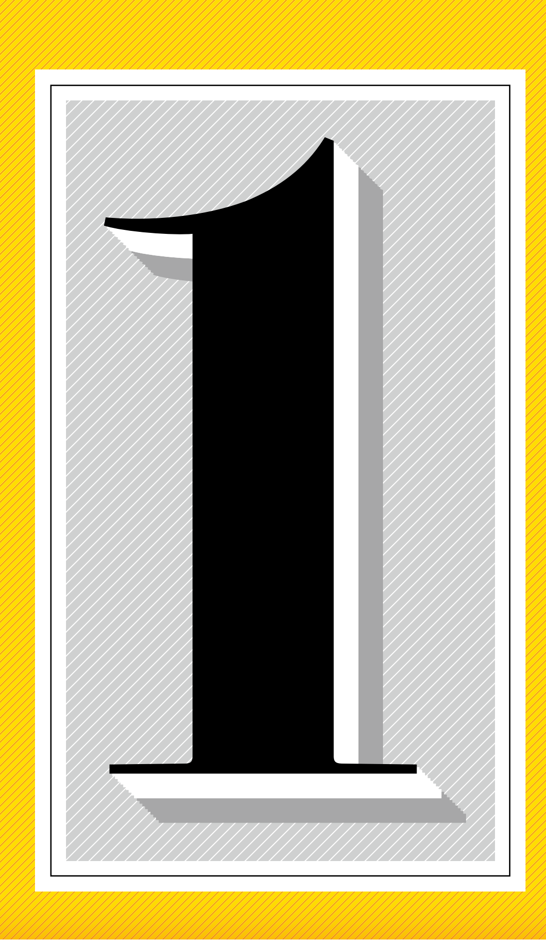
PÁGINA 78

9

¿CUÁNTO DURARÁ LA ESPECIE HUMANA?

PÁGINA 84





¿QUÉ HUELLAS DEJAREMOS EN EL PLANETA?

Jan Zalasiewicz

UNA HISTORIA ESTRATIFICADA





Jan Zalasiewicz es catedrático de paleobiología en la Universidad de Leicester, Inglaterra, y director del Grupo de Trabajo sobre el Antropoceno de la Comisión Internacional de Estratigrafía.

La idea surgió en México, en el año 2000, totalmente improvisada por Paul Crutzen, uno de los científicos más respetados del mundo. El investigador holandés, muy conocido por sostener que una guerra atómica sin cuartel causaría un «invierno nuclear» letal para la fauna y la flora terrestres, obtuvo el premio Nobel por sus investigaciones sobre otra amenaza mundial: la destrucción de la capa de ozono causada por el ser humano [*véase* «Una atmósfera cambiante», por Thomas E. Graedel y Paul J. Crutzen; Investigación y Ciencia, noviembre de 1989].

EN SÍNTESIS

Aunque el ser humano ha alterado el sistema terrestre, los científicos debaten acerca de si esos cambios dejarán huellas permanentes en los estratos geológicos que definen formalmente las épocas y las eras.

Hemos diseminado aluminio, plásticos, hormigón, partículas de carbono (procedentes de la quema de combustibles fósiles), insecticidas y partículas radiactivas (liberadas por bombas nucleares) por mares y continentes. Ello favorece la declaración del Antropoceno como una nueva época.

Queda por dilucidar si la nueva época habría empezado hace miles de años, cuando comenzaron a discernirse los primeros efectos antrópicos, o si solo se iniciará en un futuro, cuando se expresen por completo las consecuencias de nuestras actividades.

En México, Crutzen escuchaba a los expertos discutir las pruebas de los cambios ambientales que habían acontecido a escala global a lo largo del Holoceno, una época diferenciada que, según los geólogos, comenzó hace 11.700 años y hoy sigue su transcurso. Cada vez más frustrado, terminó estallando: «¡No! Ya no estamos en el Holoceno. ¡Estamos...», e hizo una pausa para pensar, «... en el Antropoceno!».

El silencio invadió la sala. Parecía que el término había tocado la fibra sensible, y siguió mencionándose una y otra vez durante el resto del encuentro. Aquel año, Crutzen escribiría un artículo con Eugene Stoermer (hoy ya fallecido), especialista en diatomeas que, unos años atrás, había acuñado el término *Antropoceno*. Las pruebas, según exponían ambos autores en aquel trabajo, eran claras: la humanidad industrializada había alterado la composición de la atmósfera y los océanos terrestres y había modificado el paisaje y la biosfera (incluidas las poblaciones de diatomeas). Estábamos viviendo en un nuevo planeta dirigido por fuerzas antrópicas, considerablemente distinto del mundo anterior. Reforzado por el prestigio de Crutzen y por su forma de escribir persuasiva y vívida, el concepto se expandió rápidamente entre los miles de científicos del Programa Internacional Geosfera-Biosfera, que había patrocinado el encuentro de México. El «Antropoceno» comenzó a aparecer en artículos científicos escritos en todo el mundo.

Pero ¿se trata realmente de un cambio geológico; es decir, de un cambio tan profundo que sus huellas hayan quedado grabadas en los estratos geológicos de todo el planeta? ¿Podría la humanidad causar un cambio tan radical como el ocurrido hace entre 18.000 y 8000 años, durante la transición entre el Pleistoceno y el Holoceno, cuando los inmensos glaciares que cubrían buena parte del planeta empezaron a retroceder y su fusión causó un ascenso del nivel del mar de 120 metros en todo el globo? ¿Podrían resultar los efectos provocados en el suelo por el ser humano tan significativos como cuando comenzó el Pleistoceno, hace 2,6 millones de años, y la Edad de Hielo estableció su dominio? ¿Podrían equipararse unos efectos de la actividad humana que solo tienen unos siglos de antigüedad con los grandes cambios que se han producido a lo largo de nuestro tumultuoso pasado geológico, cuyas unidades de tiempo se miden en millones o incluso miles de millones de años?

La idea ya había aparecido anteriormente. En el siglo xix y a principios del xx, algunos investigadores, como el sacerdote italiano Antonio Stoppani y el naturalista estadounidense Joseph LeConte, barajaron términos como Antropozoico y Psicozoico, pero los geólogos se mostraron reacios e incluso mordaces. ¿Cómo podía compararse la actividad humana —por impresionante que nos parezca— con unos cambios tan profundos como la creación y la destrucción de océanos y cadenas montañosas, las erupciones volcánicas masivas o los descomunales impactos meteoríticos? Ante tales dimensiones, las acciones humanas parecían fugaces y efímeras.

Existía también otro problema. Los términos geológicos, como Jurásico, Cretácico, Pleistoceno y Holoceno, no son meras etiquetas. Se trata de denominaciones formales integradas en una compleja escala temporal geológica, la cual caracteriza de manera fundamental la evolución, el desarrollo y las agonías de la Tierra a lo largo de 4600 millones de años. Los nombres se aceptaron únicamente tras décadas de recogida de datos y tras los pertinentes debates de la Comisión Internacional de Estratigrafía. Las «épocas», así como las «eras» a las que pertenecen, gozan de un significado técnico específico y los geólogos se las toman muy en serio. La declaración de una nueva época implicaría que, según los científicos, el hombre ha alterado el curso de la evolución planetaria.

El Antropoceno no se ha visto sometido al proceso habitual de evaluación. Y Crutzen, a pesar de la alta estima de la que goza, era un químico atmosférico que estudiaba efectos ambientales, no un geólogo experto en estratos rocosos. Hacia 2008, sin embargo, los miembros de la Comisión de Estratigrafía de la Sociedad Geológica de Londres repararon en que estaba aumentando el uso del término en la bibliografía, como si, efectivamente, fuera una época formal. Así pues, la Sociedad decidió abordar esa tendencia.

Las reuniones de ese precavido y conservador grupo de expertos se celebran en la antigua Sala del Consejo de la londinense Burlington House, cuyas paredes están repletas de solemnes retratos y por cuyas estancias pasearon en su día los gigantes victorianos de la ciencia, como Charles Darwin. Sumidos en un contexto tan tradicional, los científicos empezaron a valorar geológicamente el Antropoceno. Probablemente para su propia sorpresa, la mayoría de ellos se

mostró de acuerdo en que el término «tenía mérito» como unidad formal que podría incluirse en la escala temporal geológica oficial. Por tanto, debía someterse a examen. El geólogo Philip Gibbard, quien también presidía la Subcomisión de Estratigrafía del Cuaternario de la Comisión Internacional de Estratigrafía (la cual puede decidir sobre la escala temporal geológica), propuso un grupo de trabajo que, desde entonces, ha estado analizando la cuestión.

Para poder esgrimir argumentos a favor, los científicos deben demostrar que los efectos de la actividad humana dejarán una huella clara y fosilizada en los estratos, la cual podrá ser distinguida con facilidad dentro de decenas o centenas de millones de años. Es fundamental insistir en la cuestión de los estratos. Para un geólogo, los estratos equivalen a tiempo geológico. La clave reside en las unidades cronoestratigráficas; es decir, en un conjunto de estratos que puedan romperse con un martillo, muestrearse o excavarse (como en el caso de los huesos de dinosaurio) y que definan una nueva etapa de la historia. Para que la época del Antropoceno presente un significado geológico de tal relevancia y cuente con la oportunidad de adquirir un sentido formal, debe mostrar su propia unidad cronoestratigráfica. ¿Existen datos suficientes para que sea aceptado? Como veremos, pueden encontrarse buenos argumentos en su defensa.



EL SER HUMANO pavimenta el paraíso. Con ello altera los estratos del planeta y define una nueva época geológica: el Antropoceno.

ROCAS ANTRÓPICAS

Comencemos por los minerales, los componentes fundamentales de las rocas. Los metales, por ejemplo, se encuentran casi siempre enlazados en diversos tipos de óxidos, carbonatos y silicatos (salvo raras excepciones, como el oro). Los humanos hemos aprendido a separar ingentes cantidades de metales de dichos compuestos. Hemos manufacturado más de 500 millones de toneladas métricas de aluminio desde la Segunda Guerra Mundial, una cantidad suficiente para cubrir EE.UU. con papel de aluminio. Al verter miles de millones de latas, aparatos, envoltorios de cajetillas de cigarrillos y otros desechos por el terreno y en vertederos, el aluminio en estado puro pasa a formar parte de las capas sedimentarias actuales.

El último gran incremento en formas minerales se produjo hace unos 2500 millones de años, cuando la atmósfera terrestre se oxigenó, lo que dio lugar a una serie de óxidos e hidróxidos, entre ellos la herrumbre (óxidos de hierro), que tiñó de rojo el paisaje grisáceo. Pero las personas han causado en la actualidad un nuevo incremento como consecuencia de la síntesis





LAS MONTAÑAS de plástico en Yakarta y de hormigón en Nueva York persistirán lo suficiente como para quedar registradas de forma permanente en la corteza terrestre.

de compuestos minerales como el carburo de wolframio, común en herramientas y bolígrafos. Quizá los inventos más sorprendentes sean «mineraloides», como los vidrios y los plásticos. Antes de la Segunda Guerra Mundial, los plásticos se limitaban a unos pocos productos como la goma laca, la baquelita y el rayón. Pero, después de la guerra, su producción se disparó hasta alcanzar los 300 millones de toneladas métricas que hoy en día se fabrican cada año; aproximadamente, la masa del conjunto de los cuerpos humanos vivos. Las cualidades que nos parecen tan útiles de los plásticos (durabilidad y resistencia al deterioro) implican también su persistencia en el ambiente durante muchos años.

Los desechos de plástico dejan una profunda huella en el suelo, pero todavía más en los océanos. Dado que numerosas criaturas marinas ingieren plástico, buena parte de él termina en el barro del fondo marino cuando los animales mueren, el primer paso de la fosilización. Aún más diseminados, aunque invisibles a nuestros ojos, se encuentran los microplásticos, como las fibras que se desprenden de la ropa sintética. Incluso en los fondos oceánicos más remotos, alejados de los continentes, los investigadores hallan miles de fibras en cada metro cuadrado de barro.

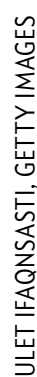
También se encuentran por todas partes rocas fabricadas por el ser humano. Por su mera cantidad, el hormigón cuenta con la supremacía absoluta. En estos momentos hemos fabricado ya cerca de medio billón de toneladas, lo que equivale a un kilo de hormigón por cada metro cuadrado de superficie terrestre. El hormigón forma las superestructuras de nuestros edificios, carreteras y presas, cuyos fragmentos rotos abundan ahora en el revuelto subsuelo de nuestras ciudades. Por tanto, constituye ya una roca característica del Antropoceno, junto con los ladrillos y la cerámica de factura humana. Enormes masas de roca sintética forman parte de la porción más superficial de la corteza terrestre, que a su vez redistribuimos a medida que nuestra maquinaria excava y levanta el suelo para construir edificios y cultivar alimentos. En la actualidad, los humanos transportamos más sedimentos que las fuerzas naturales, como los ríos o el viento.

HUELLAS QUÍMICAS

En el siglo pasado, la quema de combustibles fósiles potenció en gran medida la acelerada producción y el depósito planetario de nuevos materiales de estratos: de aluminio, de plástico, de hormigón. Igualmente, los subproductos de la combustión son tan voluminosos que también dejan diversas huellas químicas en los sedimentos de todo el globo. Desde el inicio de la Revolución Industrial, la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera ha aumentado unas cien veces más rápido que durante la retirada de los glaciares a comienzos del Holoceno. Las emisiones quedan retenidas y registradas en las burbujas de aire atrapadas en las sucesivas capas de nieve y hielo que permanecen congeladas en los casquetes polares.

La combustión también produce humo, minúsculas partículas inertes que se han quemado de forma incompleta. Al depositarse sobre el terreno por todo el mundo, las partículas generan un rastro de humo geológicamente duradero. Los incendios derivados del impacto meteorítico que define el límite entre el Cretácico y el Terciario dejaron una huella similar en las rocas. Por otro lado, el carbono emitido por la quema de combustibles fósiles es particularmente rico en carbono 12 (^{12}C, la variedad estable más ligera del carbono), un isótopo que las plantas y los animales absorben con gran facilidad. Cuando estos seres vivos mueran, sus restos fosilizarán, dejando así una huella permanente y distintiva de ^{12}C asociada al Antropoceno.

La agricultura generalizada también está dejando su propio rastro químico. La humanidad empezó a cultivar plantas hace unos 10.000 años, pero solo desde principios del siglo xx los agricultores han aplicado enormes cantidades de abonos con nitrógeno extraído del aire mediante una técnica conocida como proceso de Haber-Bosch, además de con fósforo extraído del suelo. Las enormes perturbaciones en el suelo, el agua y el aire dejan claras huellas químicas. Estos compues-





tos, arrastrados por el viento desde lejanas regiones cultivadas, contaminan lagos situados en latitudes altas. Los abonos que llegan desde los campos de cultivo a los arroyos y ríos acaban en el mar, donde estimulan la sobreproducción de plancton. A medida que estas inmensas proliferaciones mueren y se descomponen, se forman «zonas muertas» que actualmente están sofocando la vida en cientos de miles de kilómetros cuadrados de suelo marino cada año. La devastada biología marina nos contará su historia en forma de fósiles en futuros estratos.

Los contaminantes orgánicos persistentes constituyen otra huella química. Entre ellos se cuentan los insecticidas y las sustancias industriales tóxicas, como las dioxinas que hoy contaminan muchos sedimentos. Algunos de ellos pueden persistir a lo largo de escalas temporales geológicas, como sucede con los compuestos de carbono de cadena larga producidos por un alga del pasado y que ahora permiten a los paleontólogos inferir cómo era el clima hace decenas de millones de años.

También son detectables las diminutas partículas radiactivas que se distribuyen por el planeta después de la explosión de una bomba nuclear. Si bien solo se lanzaron dos durante la guerra, varios países detonaron más de 500 bombas en pruebas nucleares realizadas en la atmósfera desde mediados de la década de 1940 hasta finales de los noventa. Las partículas se depositaron en el suelo, el hielo polar y los sedimentos oceánicos, y fueron absorbidas por los animales y las plantas de la superficie. Esta capa radiactiva constituye una de las huellas más distintivas del Antropoceno.

TRANSICIONES FÓSILES

Sin duda, los humanos también hemos dejado nuestra propia huella en el paisaje biológico del planeta. En concreto, nuestra especie —bien poco importante entre la biota terrestre hasta hace pocos miles de años— se ha convertido hoy en el predador dominante tanto en la tierra como en el mar. Nos apropiamos de alrededor de una cuarta parte de la producción biológica total del planeta para satisfacer nuestras necesidades. Como resultado, sumamos cerca de un tercio de la masa de todos los vertebrados terrestres, y las pocas especies animales que hemos adaptado para alimentarnos de ellas comprenden la mayor parte de los otros dos tercios. La fauna salvaje, arrojada a los márgenes, constituye el 5 por ciento o menos. Al colonizar una parte tan grande del terreno del planeta, también hemos redistribuido por completo lo que queda de vida salvaje, ya que, intencionada o accidentalmente, hemos transportado animales y plantas por todo el mundo y hemos homogeneizado la biología a escala global. Por otro lado, aniquilamos tantas especies que, dentro de uno o dos siglos, el efecto sobre la biodiversidad del planeta podría ser tan catastrófico como el de la extinción de los dinosaurios. Tales alteraciones quedarán reflejadas en un futuro lejano como el paso de una asociación fósil a otra.

Mientras tanto, la humanidad ha llevado la producción de icnofósiles, o «pistas fósiles» (marcas dejadas por seres vivos, como las huellas de dinosaurio y los agujeros de gusanos marinos), a un nivel sin precedentes. Nuestras minas y perforaciones penetran varios kilómetros en el suelo, hasta tal profundidad que dejarán una cicatriz permanente en el planeta. Las ciudades y los paisajes urbanos que han invadido la superficie terrestre tienen un doble en sus cimientos, tuberías y sistemas de transporte subterráneos.

¿PERMANENTE O PASAJERO?

En definitiva, estamos dejado detrás de nosotros un formidable catálogo de nuevas huellas geológicas. ¿Terminarán reconfigurando esos efectos los estratos terrestres y la historia futura de forma permanente,





¿EXISTE UN FUTURO PARA LA HUMANIDAD MÁS ALLÁ DE LA TIERRA?

«Creo que es una ilusión peligrosa imaginar una migración en masa desde la Tierra. En el sistema solar no hay ningún otro lugar que sea tan acogedor como la cumbre del Everest o el Polo Sur. Debemos hacer frente a los problemas del mundo aquí mismo. No obstante, me aventuro a decir que en el próximo siglo habrá grupos de aventureros que, financiados de forma privada, vivirán en Marte y después quizás en otros lugares del sistema solar.

Sin lugar a dudas habremos de desearles buena suerte a esos colonizadores pioneros a la hora de emplear técnicas cíborg y biotecnología para adaptarse a ambientes alienígenas. Al cabo de pocos siglos, se convertirán en una nueva especie: la era posthumana habrá comenzado. Los viajes más allá del sistema solar son hazañas para posthumanos, orgánicos o inorgánicos.»



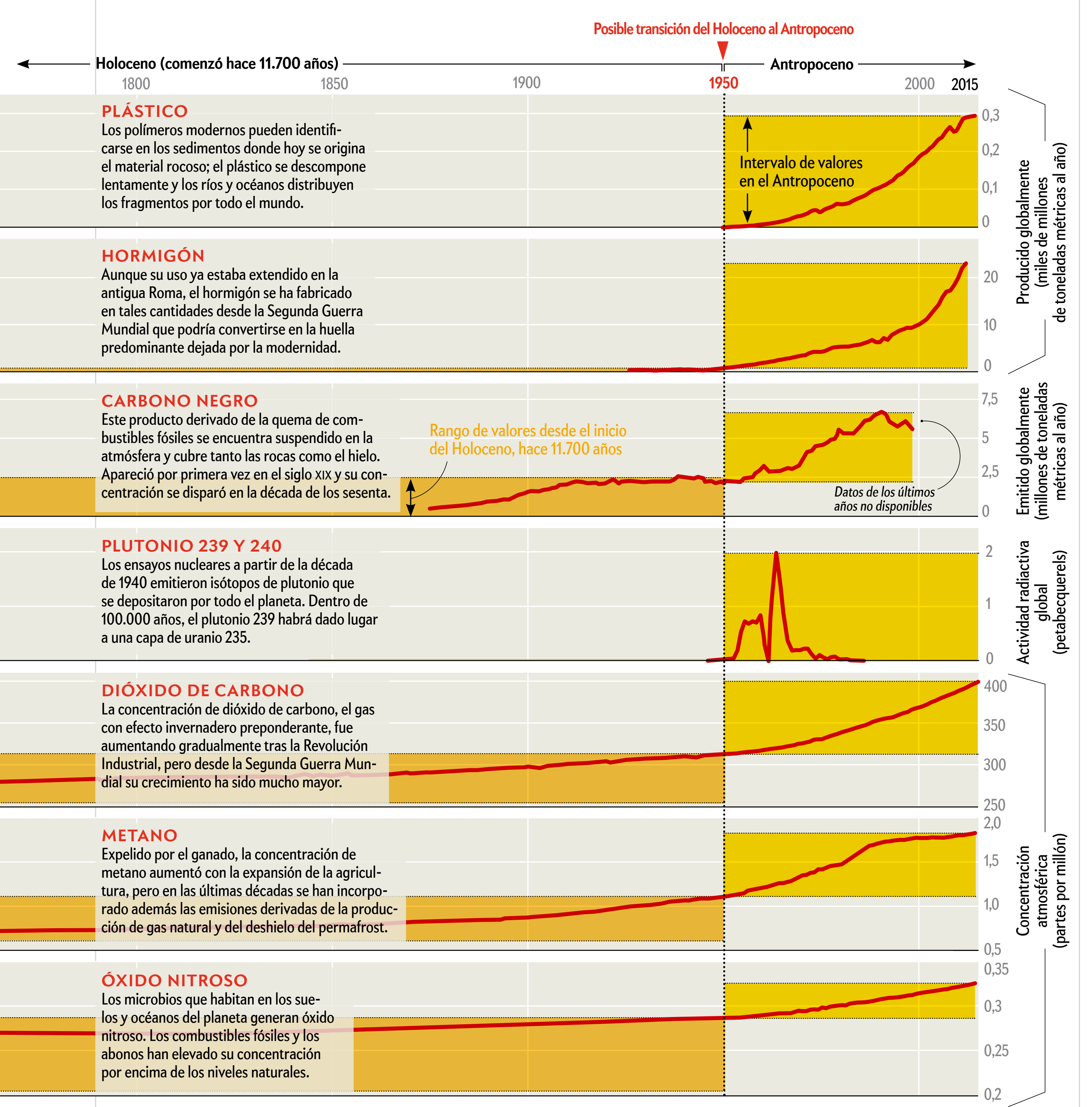
MARTIN REES
Cosmólogo y astrofísico de la Universidad de Cambridge

GEORGE HAMMERSTEIN, GETTY IMAGES (*Nueva York*); KYLE HILTON (*retrato*)

¿Cuándo comenzó el Antropoceno?

Los residuos de la humanidad moderna son tan ubicuos que nuestros «tecnofósiles», como el plástico y el hormigón, quedarán integrados en las rocas que se están formando actualmente. Los científicos acumulan cada vez más datos que apoyan la idea de que la actividad humana ha conducido al planeta a una nueva época geológica, el Antropoceno. Se cree que este podrá distinguirse con claridad del Holoceno (que comenzó cuando los glaciares se retiraron hace 11.700 años) y que el año 1950 podría representar un umbral lógico entre ambas épocas. Según Colin Waters, del Servicio Geológico Británico, los marcadores del Antropoceno (*abajo*) se han extendido por todo el globo: «Efectivamente, nos hemos convertido en una nueva fuerza geológica».

—Katie Peek



FUENTES: «THE ANTHROPOCENE IS FUNCTIONALLY AND STRATIGRAPHICALLY DISTINCT FROM THE HOLOCENE» POR COLIN N. WATERS ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 351, 8 DE ENERO DE 2016, Y REFERENCIAS CONTENIDAS EN EL ARTÍCULO; AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE EE.UU.; KATIE PEEK (*gráfico*)

y definirán por tanto una nueva época formal? ¿O, en caso de que la humanidad desapareciese, volvería el sistema terrestre a la normalidad y erosionaría nuestras construcciones hasta reducirlas a polvo, como habría de ocurrir con el poderoso imperio de Ozymandias en el poema homónimo de Percy Bysshe Shelley? Todavía es pronto para saberlo.

Por fortuna, 4000 millones de años registrados en los estratos nos han enseñado algunas lecciones. Allí donde se levanta la corteza terrestre, como en las cadenas montañosas en formación, las estructuras superficiales se erosionan y van deshaciéndose en forma de partículas sedimentarias que alcanzan mares lejanos. Allí donde la corteza subside (por ejemplo, bajo muchos de los mayores deltas del mundo), los estratos apilados pueden preservar incluso aquellos rastros aparentemente efímeros, como hojas, ramas y huellas de animales. Por tanto, San Francisco, levantada por las fuerzas tectónicas, parece destinada a desaparecer por la meteorización. Sin embargo, Nueva Orleans, Shanghái y Ámsterdam dejarán amplias huellas de sus masivas y complejas estructuras junto con un buen volumen de aluminio, plástico y cerámica, así como esqueletos con dientes metálicos y caderas artificiales. Cuando, dentro de millones de años, las fuerzas tectónicas acaben levantando estos estratos, los nuevos acantilados dejarán al descubierto una capa distintiva correspondiente al Antropoceno.

La permanencia de los fósiles, así como de las consecuencias a largo plazo de nuestras acciones, también entra en juego. El impacto meteorítico que puso fin al periodo Cretácico fue un evento instantáneo; la inmediata onda expansiva cesó al cabo de unas horas. Sin embargo, sus efectos remodelaron la biología durante millones de años y todavía convivimos con sus reverberaciones. Sin aquel meteorito quizá no estaríamos hoy aquí, y es posible que los dinosaurios todavía imperasen en la Tierra.

El impacto de la humanidad, no tan repentino, podría igualmente cambiar el planeta de formas que se seguirán percibiendo mucho después de nuestra desaparición. Numerosas tendencias se están acelerando, y algunas de ellas (extinción de especies, cambio climático y aumento del nivel del mar) tan solo se encuentran en sus estados iniciales. Independientemente de cuándo termine la era de los combustibles fósiles, sus efectos se atenuarán muy despacio, a lo largo de muchos milenios. (Y la civilización humana, surgida en un Holoceno ambientalmente estable, deberá adaptarse a un planeta inestable y cambiante durante numerosas generaciones.)

Sin embargo, también podríamos ejercer una influencia a largo plazo de otra forma. La humanidad es una fuerza planetaria mucho más compleja y proteica que un impacto meteorítico o la retirada de los glaciares. Nuestro extraordinario poder geológico deriva de nuestra inteligencia, nuestra capacidad manipulativa y nuestras interacciones hipersociales, que permiten transmitir los nuevos conocimientos. Gracias a esas cualidades hemos logrado desarrollar la tecnología que ahora nos mantiene vivos y que evoluciona a ritmo acelerado, literalmente de un año para otro.

Puede considerarse que la emergente tecnosfera, como la denomina Peter Haff, profesor emérito de la Universidad Duke, es un vástago de la biosfera. Presenta una dinámica propia, la cual solo controlamos en parte. También existe la posibilidad de que una futura inteligencia basada en el silicio pudiera competir con la nuestra. Entre todos los cambios globales en marcha que determinarán el futuro geológico de la Tierra, la tecnosfera es el factor imprevisible. Podría conducir hacia un estado planetario revisado del Antropoceno, en el que las personas ya no llevarán la voz cantante. De momento, los científicos solo pueden decidir cómo se caracteriza el presente. Una Tierra que el ser humano está transformando rápida, profunda y permanentemente ¿debe ser reconocida formalmente como signo de una nueva época dentro de la escala temporal geológica?

Para los geólogos que afrontarán esa determinación, las espadas siguen en alto. Deben tomarse decisiones importantes. Por ejemplo, ¿cuándo habría comenzado el Antropoceno? Las sugerencias sitúan su inicio tanto hace miles de años, cuando empezaron a distinguirse los primeros efectos antrópicos, como en un futuro lejano, cuando nuestra influencia quede expresada en su totalidad. Por razones prácticas, parece que el límite más adecuado es la «gran aceleración» de la población, el consumo energético y la industrialización que se produjo a mediados del siglo xx. A partir de ese momento, los estratos se caracterizan por un acentuado incremento de hormigón, plásticos y plutonio, así como por los restos de una biología transformada.

Los geólogos están buscando una referencia cuidadosamente seleccionada que sirva como marcador global de una nueva época («clavo de oro», la llaman, en referencia al que marcó el punto de unión de las dos líneas que, juntas, constituyeron el ferrocarril transcontinental de Estados Unidos). ¿Podrían serlo los núcleos radiactivos o las partículas de carbono atrapadas en las capas de nieve y hielo de Groenlandia y la Antártida, en las capas sedimentarias de fiordos y lagos remotos, o en fondos oceánicos intactos? ¿O podría serlo otro indicador, como un cambio en la química de los seres vivos preservado en los anillos de los árboles y en las bandas de crecimiento coralino anuales? La búsqueda continúa.

PARA SABER MÁS

Adventures in the Anthropocene: A journey to the heart of the planet we made. Gaia Vince. Milkweed Editions, 2014.

The Anthropocene: The human era and how it shapes our planet. Christian Schwägerl. Synergetic Press, 2014.

The unnatural world: The race to remake civilization in Earth's newest age. David Biello. Scribner, 2016.

Grupo de Trabajo sobre el Antropoceno, Subcomisión sobre Estratigrafía Cuaternaria: **quaternary.stratigraphy.org/workinggroups/anthropocene**

EN NUESTRO ARCHIVO

Calentamiento antropogénico preindustrial. William F. Ruddiman en *IyC*, mayo de 2005.

Lagos alpinos: observatorios del cambio global. Lluís Camarero en *IyC*, agosto de 2013.



¿CÓMO NOS CAMBIARÁ EL CALENTAMIENTO?

Katie Peek

ADAPTACIÓN CLIMÁTICA

Nadie sabe si a finales de siglo nuestra consciencia residirá en un chip informático ni si los coches se desplazarán solos por las carreteras. Pero algo sí es seguro: la Tierra se habrá calentado. El mapa que reproducimos aquí, en cuya elaboración han participado geólogos del Centro de Investigación Ames de la NASA, indica cuánto habrá aumentado la temperatura del planeta en 2100 y cómo habrán cambiado las precipitaciones. A partir de los modelos climáticos de alta resolución usados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), los investigadores han calculado cómo será el clima en prácticamente cada punto del planeta y en cada mes del año a finales de siglo. La previsión contempla un escenario intermedio de emisiones: se ha supuesto que estas se reducirán hacia mediados de siglo, pero aun así viviremos un calentamiento sustancial.

Se estima que unos 10.000 millones de personas habitarán en ese mundo más cálido. Algunas de ellas se convertirán en refugiados climáticos, que huirán de las zonas donde una temperatura insoportable se haya vuelto la norma o donde el aumento del nivel del mar haya destruido hogares. Con todo, los analistas prevén un número relativamente bajo de movimientos fronterizos: la mayoría de las comunidades se adaptarán in situ. A continuación se muestran varias regiones que se verán alteradas por el calentamiento, así como algunas estrategias que ya se están adoptando para afrontar el futuro.

NEWTOK

Según las previsiones, el Ártico sufrirá el calentamiento más acusado del planeta. La aldea esquimal de Newtok, en Alaska, ya se enfrenta a las tormentas costeras y al deshielo del permafrost, que deterioran el terreno. Sus cerca de 400 residentes votaron en 2003 trasladarse a una zona más elevada, a unos 15 kilómetros de distancia, pero se han hecho pocos progresos: la comunidad sigue intentando que el plan se apruebe y que se financie la construcción de carreteras, viviendas y un aeropuerto. Su situación muestra que, aun cuando una comunidad quiere mudarse, la burocracia puede dificultar el traslado.

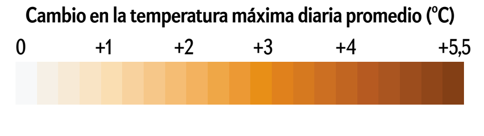
TUVALU

Podría parecer que, al elevarse el nivel del mar, las naciones insulares llanas desaparecerán. De hecho, el presidente de las Maldivas está tratando de redistribuir a gran parte de la población del país. Sin embargo, un equipo neozelandés ha hallado que los atolones de Tuvalu, una nación de 11.000 habitantes situada a unos 5 metros sobre el nivel del mar, se están expandiendo. Las tormentas y las mareas erosionan algunas costas, pero crean nuevo terreno allí donde depositan la arena y la grava. El reto para Tuvalu consistirá en adecuar sus construcciones a un paisaje en constante cambio.

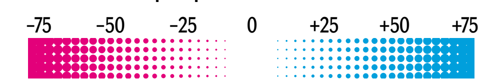
LEYENDA

El mapa indica cuánto habrán variado el promedio de la temperatura máxima diaria y las precipitaciones anuales hacia 2100. Los valores actuales se basan en la media calculada entre 2006 y 2010; los futuros, en la media prevista entre 2091 y 2100. Los datos reflejan el promedio de 20 modelos del «escenario de Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) 4,5», según el cual las emisiones alcanzarán un máximo en 2040 y luego disminuirán (el calentamiento continuará mucho después de que las emisiones se reduzcan).

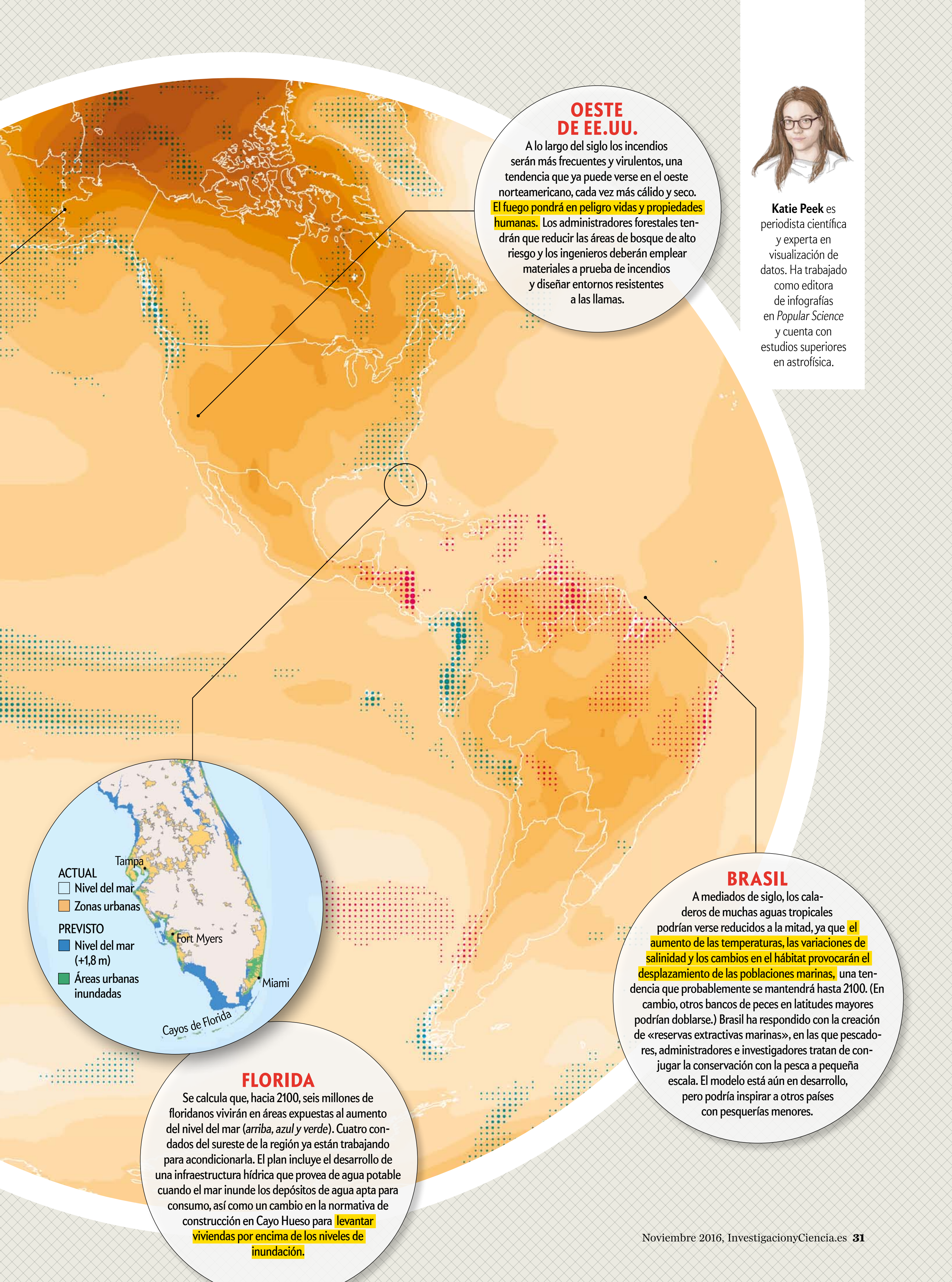
Cambio en la temperatura máxima diaria promedio (°C)



Variación en la precipitación anual media (centímetros)



FUENTES: DATOS DE INTERCAMBIOS TERRESTRES DE LA NASA - PROYECCIONES GLOBALES DIARIAS REDUCIDAS (NEX-GDDP) *(mapa principal e inserto sobre monzones)*; OFICINA DE LA NOAA SOBRE GESTIÓN COSTERA *(inserto sobre Florida)*



OESTE DE EE.UU.

A lo largo del siglo los incendios serán más frecuentes y virulentos, una tendencia que ya puede verse en el oeste norteamericano, cada vez más cálido y seco. El fuego pondrá en peligro vidas y propiedades humanas. Los administradores forestales tendrán que reducir las áreas de bosque de alto riesgo y los ingenieros deberán emplear materiales a prueba de incendios y diseñar entornos resistentes a las llamas.

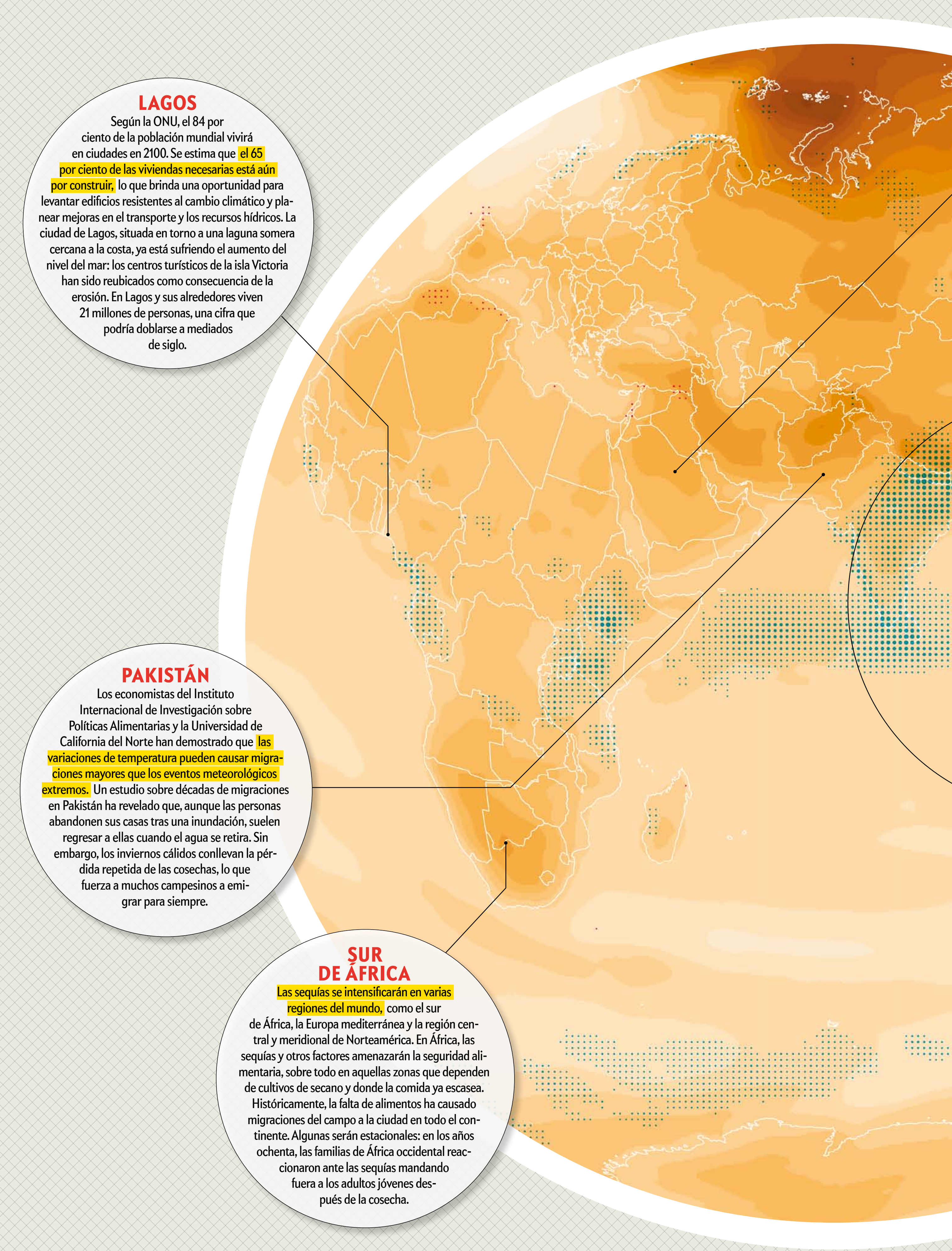
FLORIDA

Se calcula que, hacia 2100, seis millones de floridanos vivirán en áreas expuestas al aumento del nivel del mar (*arriba, azul y verde*). Cuatro condados del sureste de la región ya están trabajando para acondicionarla. El plan incluye el desarrollo de una infraestructura hídrica que provea de agua potable cuando el mar inunde los depósitos de agua apta para consumo, así como un cambio en la normativa de construcción en Cayo Hueso para levantar viviendas por encima de los niveles de inundación.

BRASIL

A mediados de siglo, los caladeros de muchas aguas tropicales podrían verse reducidos a la mitad, ya que el aumento de las temperaturas, las variaciones de salinidad y los cambios en el hábitat provocarán el desplazamiento de las poblaciones marinas, una tendencia que probablemente se mantendrá hasta 2100. (En cambio, otros bancos de peces en latitudes mayores podrían doblarse.) Brasil ha respondido con la creación de «reservas extractivas marinas», en las que pescadores, administradores e investigadores tratan de conjugar la conservación con la pesca a pequeña escala. El modelo está aún en desarrollo, pero podría inspirar a otros países con pesquerías menores.

Katie Peek es periodista científica y experta en visualización de datos. Ha trabajado como editora de infografías en *Popular Science* y cuenta con estudios superiores en astrofísica.



LAGOS

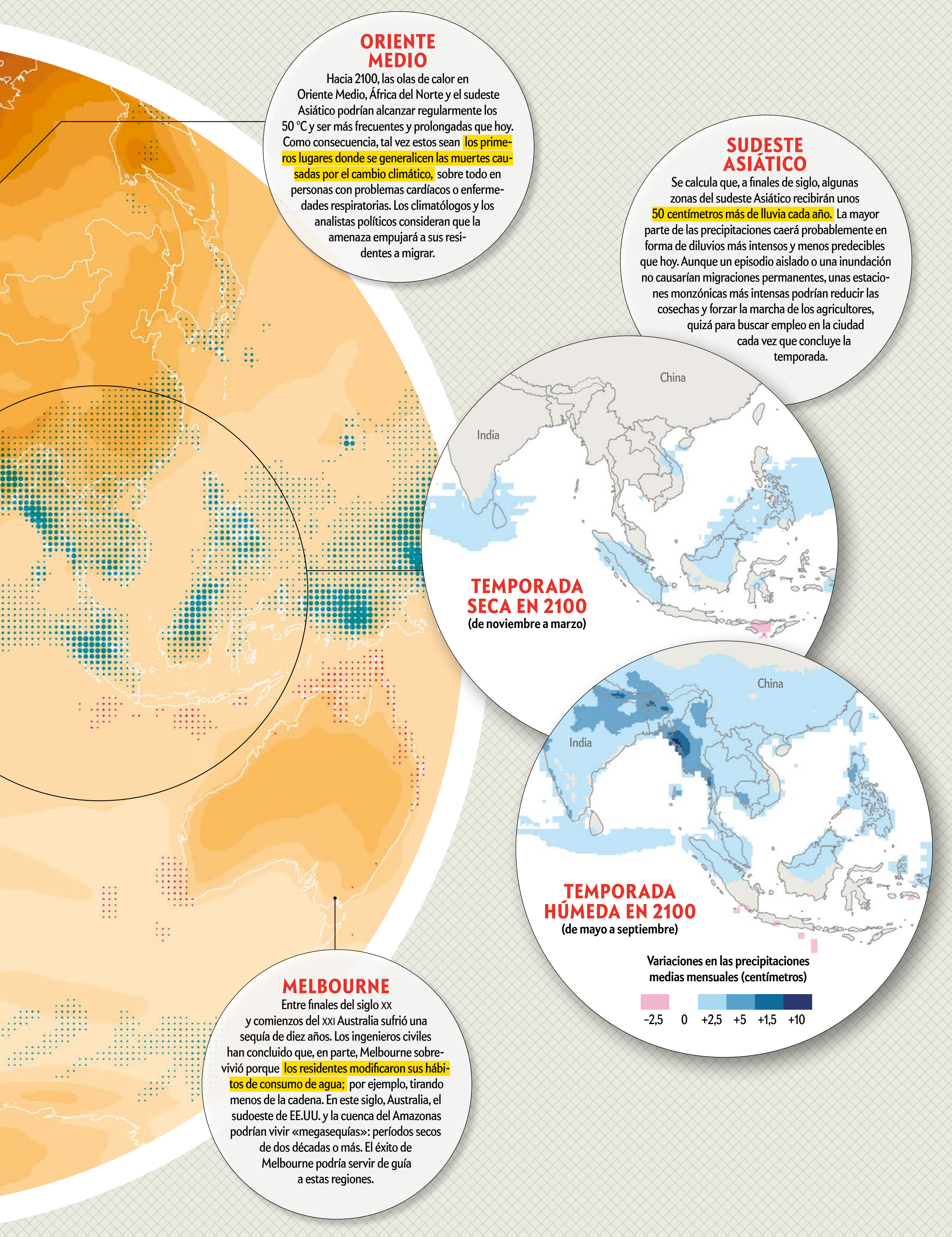
Según la ONU, el 84 por ciento de la población mundial vivirá en ciudades en 2100. Se estima que el 65 por ciento de las viviendas necesarias está aún por construir, lo que brinda una oportunidad para levantar edificios resistentes al cambio climático y planear mejoras en el transporte y los recursos hídricos. La ciudad de Lagos, situada en torno a una laguna somera cercana a la costa, ya está sufriendo el aumento del nivel del mar: los centros turísticos de la isla Victoria han sido reubicados como consecuencia de la erosión. En Lagos y sus alrededores viven 21 millones de personas, una cifra que podría doblarse a mediados de siglo.

PAKISTÁN

Los economistas del Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias y la Universidad de California del Norte han demostrado que las variaciones de temperatura pueden causar migraciones mayores que los eventos meteorológicos extremos. Un estudio sobre décadas de migraciones en Pakistán ha revelado que, aunque las personas abandonen sus casas tras una inundación, suelen regresar a ellas cuando el agua se retira. Sin embargo, los inviernos cálidos conllevan la pérdida repetida de las cosechas, lo que fuerza a muchos campesinos a emigrar para siempre.

SUR DE ÁFRICA

Las sequías se intensificarán en varias regiones del mundo, como el sur de África, la Europa mediterránea y la región central y meridional de Norteamérica. En África, las sequías y otros factores amenazarán la seguridad alimentaria, sobre todo en aquellas zonas que dependen de cultivos de secano y donde la comida ya escasea. Históricamente, la falta de alimentos ha causado migraciones del campo a la ciudad en todo el continente. Algunas serán estacionales: en los años ochenta, las familias de África occidental reaccionaron ante las sequías mandando fuera a los adultos jóvenes después de la cosecha.



ORIENTE MEDIO
Hacia 2100, las olas de calor en Oriente Medio, África del Norte y el sudeste Asiático podrían alcanzar regularmente los 50 ºC y ser más frecuentes y prolongadas que hoy. Como consecuencia, tal vez estos sean los primeros lugares donde se generalicen las muertes causadas por el cambio climático, sobre todo en personas con problemas cardíacos o enfermedades respiratorias. Los climatólogos y los analistas políticos consideran que la amenaza empujará a sus residentes a migrar.
SUDESTE ASIÁTICO
Se calcula que, a finales de siglo, algunas zonas del sudeste Asiático recibirán unos 50 centímetros más de lluvia cada año. La mayor parte de las precipitaciones caerá probablemente en forma de diluvios más intensos y menos predecibles que hoy. Aunque un episodio aislado o una inundación no causarían migraciones permanentes, unas estaciones monzónicas más intensas podrían reducir las cosechas y forzar la marcha de los agricultores, quizá para buscar empleo en la ciudad cada vez que concluye la temporada.
China
India
TEMPORADA SECA EN 2100
(de noviembre a marzo)
China
India
TEMPORADA HÚMEDA EN 2100
(de mayo a septiembre)
Variaciones en las precipitaciones medias mensuales (centímetros)
−2,5
0
+2,5
+5
+1,5
+10
MELBOURNE
Entre finales del siglo XX y comienzos del XXI Australia sufrió una sequía de diez años. Los ingenieros civiles han concluido que, en parte, Melbourne sobrevivió porque los residentes modificaron sus hábitos de consumo de agua; por ejemplo, tirando menos de la cadena. En este siglo, Australia, el sudoeste de EE.UU. y la cuenca del Amazonas podrían vivir «megasequías»: períodos secos de dos décadas o más. El éxito de Melbourne podría servir de guía a estas regiones.


الله اكبر



¿QUIÉN PROGRESARÁ Y QUIÉN SE QUEDARÁ ATRÁS?

Mara Hvistendahl

VIVIR EN UN MUNDO SUPERPOBLADO

ANDREW MYERS (*fotografía*); ANGELA CAMPOS, STOCKLAND MARTEL (*composición*)

Lena y Saheed nunca se han conocido y, con toda probabilidad, nunca lo harán. Corre el año 2050 y Lena vive en Leipzig, una histórica y plácida ciudad alemana de profesionales de mediana edad. A sus 51 años, se halla en la mitad de su carrera profesional como farmacéutica y le faltan más de dos décadas para jubilarse. Ella y su marido ya no tienen que mantener a su única hija recién licenciada, pero les preocupa el cuidado de sus ancianos padres que, cumplidos los 80 y 90 años, respectivamente, todavía gozan de relativa buena salud. Saheed, de 22 años, desempleado y sin pareja, tiene cuatro hermanos y vive en un suburbio destartalado a las afueras de Lagos, en Nigeria. Sus problemas y los de sus hermanos son de naturaleza muy diferente: hallar empleo en un precario mercado laboral desbordado de trabajadores jóvenes y conseguir vivienda y agua potable.



Mara Hvistendahl es corresponsal colaboradora en *Science* y autora de *Unnatural selection: Choosing boys over girls and the consequences of a world full of men* (Public Affairs, 2011).

EN SÍNTESIS

Aunque el crecimiento de la población mundial se esté desacelerando, no se detiene. En 2050, el mundo podría acoger a 9700 millones de personas. Pero más relevante que esta cifra es cómo se distribuirá el crecimiento.

Algunos países ricos verán reducida su población y su dinamismo debido a la caída de la natalidad y al envejecimiento de su ciudadanía.

Los países en vías de desarrollo, entre tanto, se volverán más populosos y, en promedio, más jóvenes. Este cambio demográfico supone una oportunidad económica y también un reto político en cuanto a infraestructuras y asistencia sanitaria.

Lena está preocupada por las enfermedades crónicas. Saheed tiene más probabilidades de contraer malaria. Alemania lucha por adaptar las pensiones, la asistencia sanitaria y los sistemas de servicios públicos a una población menguante que vive más años que nunca. Nigeria se afana en construir carreteras, escuelas e instalaciones sanitarias a medida que sus ciudades se expanden.

Las vidas de Lena y Saheed no podrían ser más diferentes. Pero estos dos personajes ficticios y divergentes encarnan muchos de los problemas que nos depara el futuro. La distribución de la población humana va a cambiar de un modo inusitado en las próximas décadas y obligará a los Gobiernos y a la comunidad internacional a replantearse cómo proteger la salud y el bienestar de los habitantes del planeta. Las decisiones que tomen hoy determinarán si el futuro de las personas como Lena y Saheed resultará prometedor o desolador.

INERCIA DEMOGRÁFICA

Hace alrededor de medio siglo, la atención popular se centraba en una única tendencia mundial de la población: su crecimiento desmesurado. El entomólogo de la Universidad Stanford Paul R. Ehrlich publicó en 1968 el libro *La explosión demográfica*. En este superventas alertaba de que el rápido crecimiento de la población superaría la producción de alimentos y otros recursos y, como consecuencia, cientos de millones de personas morirían de hambre. Sin embargo, los temores de Ehrlich no se materializaron. La revolución verde pronto mejoró la seguridad alimentaria, y una combinación de desarrollo económico y acceso a la educación y a la planificación familiar comportó una bajada de la tasa de natalidad en la mayor parte del mundo. Hacia 1970, el crecimiento anual había empezado a declinar desde su máximo del dos por ciento alcanzado en 1960.

Con todo, el aumento de la población es como un tren en movimiento. Incluso aunque decelere, posee una gran inercia. Hoy la tasa de crecimiento mundial continúa descendiendo, pero en las próximas décadas miles de millones de personas se incorporarán al grueso de la población. Naciones Unidas estima que hacia 2050 alcanzará los 9700 millones. La probabilidad de que el tren acabe deteniéndose y la población mundial se estabilice o empiece a declinar antes del año 2100 es de tan solo el 23 por ciento.

No obstante, si nos centramos únicamente en estas proyecciones generales, pasamos por alto matices importantes. La mitad del crecimiento entre hoy y el año 2050 tendrá lugar en nueve países, cinco de ellos africanos. Mientras tanto, al otro lado del mundo descenderá la natalidad y aumentará la esperanza de vida. Según la ONU, en los próximos 34 años, el número de personas de sesenta años o más se duplicará con creces y el de quienes ya han cumplido los ochenta se triplicará. Muchos de esos ancianos vivirán en Europa, donde, según las previsiones, el sector demográfico de sesenta años o más superará la tercera parte de la población hacia 2050. Jack A. Goldstone, politólogo de la Universidad George Mason y director del Instituto de políticas públicas de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Hong Kong, denomina a esta alteración del orden mundial «la nueva explosión demográfica».

Alemania y Nigeria representan extremos opuestos de esa dinámica global. En un lado se halla un país rico que envejece con rapidez y en donde la población urbana disminuye y los Gobiernos afrontan cada vez mayores costes derivados de las pensiones. En el otro lado se sitúa una nación joven que tendrá que acomodar a más migrantes urbanos y a más niños, una tendencia que podría agravar los problemas ya existentes, como el cambio climático y las enfermedades infecciosas. Según Hans Groth, presidente del Foro Mundial sobre Demografía y Envejecimiento de San Galo, en Suiza, en el caso particular de Nigeria la historia no nos sirve de referencia para saber lo que nos espera. «No estamos preparados para gestionar o asimilar cambios de tanta envergadura.»

LOS PROBLEMAS DEL CRECIMIENTO

Hacia 2050 se espera que Nigeria sobrepase a Estados Unidos y se convierta en el tercer país más habitado del mundo. Su población se duplicará con creces y alcanzará, según la ONU, 398,5 millones de personas. Es decir, durante sus años de juventud, Saheed observará cómo los recursos de Nigeria, ya de por sí escasos, disminuirán todavía más. «Pensemos en ello. Todo lo creado por los humanos en el país tiene que duplicarse. Cada escuela, cada clínica, cada puente», explica John Bongaarts, vicepresidente del Consejo de Población de la ciudad de Nueva York.

En 2015, la División de Población de la ONU revisó al alza sus estimaciones del crecimiento demográfico de África. Hasta cierto punto, el cambio reflejaba noticias positivas: gracias al avance en la salud pública, con medidas que habían reducido la mortalidad infantil y la muerte por sida, la esperanza de vida en el África subsahariana había aumentado.

Pero la otra cara de la moneda es que la natalidad no ha disminuido con la celeridad que muchos esperaban. En todo el continente, el índice de natalidad (el número medio de hijos que tiene una mujer a lo largo de su vida) se mantiene en 4,7. En Nigeria, en 5,7. El país podría, en teoría, beneficiarse de lo que se denomina una transición demográfica. Se trata de una fase durante la cual se reduce la natalidad, y en la que existe un gran número de adultos en edad de trabajar y pocos ancianos y niños que mantener. Los países que consiguen llevar a cabo una transición demográfica (reduciendo la natalidad y la mortalidad, e impulsando la educación, el empleo y otros motores del desarrollo económico) pueden disfrutar de un «dividendo demográfico» que los catapulta al siguiente nivel de desarrollo. Pero en Nigeria, como en otras partes del África subsahariana, la natalidad tan solo ha disminuido ligeramente y se ha estancado en una cifra todavía alta.

Los demógrafos citan varios posibles factores que explican esa inadaptación, desde la persistente influencia de las culturas tribales hasta el mayor número de años en los que las mujeres procrean. Akinrinola Bankole, demógrafa del Instituto Guttmacher de la

ciudad de Nueva York, explica que la gente todavía piensa en términos de asegurarse la vejez, en tener una gran descendencia que los cuide cuando envejezcan. No ven tanto la necesidad de invertir en los hijos para que les proporcionen esa seguridad.

Si persisten esos índices de natalidad, se agravará el abrumador conjunto de problemas que ya afronta Nigeria: pobreza, hambre y prevalencia de enfermedades contagiosas, así como los efectos del cambio climático. Según la Agencia de Referencia de Población de EE.UU., en la actualidad casi 240 millones de personas del África subsahariana, es decir, una de cada cuatro, carecen de una alimentación adecuada, y 30 millones de niños padecen infrapeso. A medida que Saheed y sus hermanos cumplan años, la región aportará cientos de millones de bocas más que alimentar. Entre las entidades que trabajan para mejorar la seguridad alimentaria se halla la Alianza para la Revolución Verde en África. Fundada en 2006 y dirigida durante más de seis años por el exsecretario general de la ONU, Kofi Annan, la organización presiona para cambiar las políticas agrícolas y ayuda a los pequeños agricultores a adquirir semillas mejoradas, abonos orgánicos y equipamiento básico. El África subsahariana necesitará todo el apoyo posible. «Que el aumento de la población se concentre en los países más pobres podría complicar en algunos de ellos la erradicación de la pobreza, la lucha contra el hambre y la malnutrición; y frenaría la ampliación de los servicios educativos y sanitarios, así como la mejora del suministro de servicios e infraestructuras básicas», explica Francois Pelletier, de la División de Población de la ONU.

En países como Nigeria, además, el ascenso de la población no se distribuiría de manera uniforme. Los índices de natalidad son, en la actualidad, bastante más altos en el norte, donde los recursos escasean más. Como consecuencia, cada vez más norteños seguirán el ejemplo de Saheed y su familia en Lagos, un cambio que forma parte de una tendencia global más amplia. Se espera que, hacia 2050, debido a la urbanización y al crecimiento de la población general, las ciudades de todo el mundo albergarán otros 2500 millones de personas más, y el noventa por ciento de este aumento tendrá lugar en Asia y África.

¿PODREMOS EVITAR UNA SEXTA EXTINCIÓN?

«Si actuamos con rapidez, se puede frenar y después atajar. La principal causa de extinción de especies es la pérdida de hábitat. Por eso, insisto en la creación de una reserva mundial que ocupe la mitad de la tierra y la mitad del mar, según se necesite. En mi libro *Half-Earth* ("La mitad de la Tierra") explico cómo puede conseguirse. Además de esta iniciativa —y del desarrollo de una ciencia de ecosistemas basada en las especies mucho mejor que la actual—, será necesario descubrir y caracterizar los cerca de diez millones de especies que se estima que desconocemos; hasta la fecha, tan solo hemos descrito dos millones. En general, ampliar la ciencia ambiental para que incluya los seres vivos debería ser, y creo que será, una gran iniciativa de la ciencia durante lo que queda de siglo.»

EDWARD O. WILSON
Catedrático emérito de la Universidad Harvard

La urbanización suele ser un fenómeno positivo si va acompañada de una mejora de la educación y un descenso de la natalidad, a la vez que se mantiene el crecimiento económico. Las ciudades bien planificadas reducen el uso de la tierra y aumentan la eficiencia energética. Henrik Urdal, politólogo del Instituto de Investigaciones de la Paz en Oslo, y sus colaboradores han descubierto que la urbanización podría incluso disminuir el riesgo de conflictos.

Pero el hecho de que países como Nigeria se estén urbanizando con un ritmo de desarrollo económico mucho más lento que en el pasado significa que, hacia 2050, una gran parte de la población mundial se concentrará en ciudades mal equipadas e incapaces de proporcionar de modo adecuado asistencia sanitaria, saneamientos y otros servicios. Todo ello incrementará las posibilidades de que Saheed contraiga alguna enfermedad infecciosa, ya que estas proliferan en áreas densamente pobladas y con un gran número de migrantes. Se considera que la urbanización ha sido el factor que más ha contribuido a



ALGUNOS PAÍSES AFRICANOS experimentarán un rápido crecimiento de población de aquí a 2050, lo que pondrá en peligro el suministro de alimentos y quizá genere una carestía similar a la de la actual crisis en Sudán del Sur.

EDWINA PICKLES, GETTY IMAGES (*fotografía*); KYLE HILTON (*retrato*)

¿PODEMOS ALIMENTAR EL PLANETA SIN DESTRUIRLO?

«Sí, y esto es lo que debemos hacer: reducir los residuos agrícolas y los asociados al consumo, así como la producción de carne; integrar técnicas y procedimientos adecuados de gestión de las semillas; concienciar a los consumidores sobre los problemas que afrontan los agricultores tanto en los países en desarrollo como en los desarrollados; aumentar los fondos públicos para la investigación y el desarrollo agrícolas; y promover los aspectos socioeconómicos y ambientales de la agricultura sostenible.»



PAMELA RONALD
Catedrática del Centro de Genómica y del departamento de fitopatología de la Universidad de California en Davis

la rápida propagación del sida en África. Hacia 2050, los suburbios de Lagos podrían convertirse en focos de tuberculosis y malaria.

A medida que Nigeria ascienda en la escala económica y más personas compren coches y consuman electricidad, la contaminación del aire podría convertirse en otra amenaza para la salud. La explosión de megaciudades en Asia en las últimas décadas nos sirve de ejemplo de lo que puede ocurrir en África. Datos recientes del Estudio sobre la Carga Mundial de Enfermedades, Lesiones y Factores de Riesgo indican que, solo en China, la contaminación del aire contribuyó en 2010 a la muerte de 1,2 millones de personas y a la pérdida de 25 millones de años de vida [*véase* «Menos emisiones, menos epidemias», por Xavier Rodó; Investigación y Ciencia, enero de 2016].

Por irónico que parezca, si Nigeria consiguiera reducir la natalidad (la causa de muchos de sus problemas), el cambio podría tener un efecto secundario desafortunado. La caída del índice de natalidad supondría un aumento del porcentaje del total de la población compuesto por varones adolescentes y en la veintena de edad. Si la economía no logra crear los suficientes puestos de trabajo, explica Bongaarts, habrá jóvenes frustrados desempleados o con empleos precarios. Podrán ser explotados fácilmente y contribuirán a la delincuencia y a la inseguridad. Los politólogos creen que esta abundancia de jóvenes contribuyó a las revueltas de la *primavera árabe* en todo el norte de África y Oriente Medio.

Para conseguir superar tales retos en los próximos años, los países como Nigeria necesitarán impulsar a un tiempo la educación, el empleo juvenil y el acceso a la planificación familiar; una tarea colosal pero no imposible. Hace cuarenta años, pocos previeron los rápidos descensos de natalidad que ocurrieron en Bangladesh, Indonesia e Irán. Si Saheed encuentra trabajo y se casa, podría decidir tener menos hijos que sus padres y así poder costearse su educación. Si cada vez más hombres como él hacen lo mismo, Nigeria podría convertir un posible lastre en una ventaja y alcanzar un dividendo demográfico. Estos cambios poblacionales han sido cruciales para el progreso económico de otros países, entre ellos Brasil, China y Corea del Sur.

EN EL VIEJO PAÍS

Los cambios que están sucediendo en Alemania se revelan muy diferentes. Lena nació en 1999, cuando la economía del país era el motor del crecimiento económico europeo y abundaba la mano de obra. Según las predicciones, la población actual de 80,7 millones se reducirá a menos de 74,5 millones hacia 2050. Casi el 40 por ciento de los alemanes tendrán para entonces sesenta años o más, mientras que los de edades comprendidas entre 15 y 59 años, que conforman la mayoría de la población activa, representarán tan solo el 48 por ciento, un 19 por ciento menos que en la actualidad. En algunos lugares de Alemania ya se ve un anticipo de lo que está por llegar. El año pasado, el septuagenario alcalde de Ottenstein, al noroeste del país, anunció que concedería terrenos a parejas con niños pequeños con el objetivo de mantener abierta la escuela del pueblo.

La situación de Alemania se refleja en toda Asia, Europa y Latinoamérica. Según las previsiones de la ONU, hacia 2050, once países, entre ellos Japón y Ucrania, habrán perdido el quince por ciento o más de su población. Los medios de comunicación ya hacen hincapié sobre el descenso de la natalidad en Alemania y sus países vecinos. La principal preocupación de los políticos, en 2050, bien podría ser la desaceleración económica sostenida provocada por la escasez de trabajadores jóvenes y de contribuyentes.

Resultaría tentador reclutar inmigrantes para rellenar el mercado laboral. La ONU prevé que, entre 2015 y 2050, Alemania será uno de los países con mayor número de inmigrantes del mundo. Los cientos de miles de familias sirias desesperadas que se desplazan a Europa con sus pertenencias a la espalda ya han puesto de relieve este tema. Mientras la población en el África subsahariana siga creciendo (especialmente si jóvenes como Saheed no encuentran empleo en sus países de origen), la oleada de migrantes también lo hará, lo que unirá el futuro de Alemania y Nigeria. Los expertos comentan a veces que esta tendencia ayudará a contrarrestar el envejecimiento de la población. Pero, como explica Goldstone, se necesitarían decenas de millones de migrantes para compensar la menguante cohorte de jóvenes en Alemania, Países Bajos y otros países con una baja natalidad; y, al mismo tiempo, se debería mitigar el rápido crecimiento de la población en los países del África subsahariana.

Ello significa que la población de Leipzig disminuirá incluso con índices de inmigración moderados. En el proceso, a la ciudad le costará adaptar su sistema de servicios públicos y otras prestaciones hacia un menor uso, quizás encareciendo las tarifas; un cambio que recaería en las personas en edad de trabajar, como Lena. Cada vez menos poblada, Leipzig podría convertirse en una ciudad cara.

Es probable que Alemania se enfrente a nuevos retos sanitarios a medida que las mejoras en salud y la mayor longevidad modifica la carga de morbilidad. Los padres de Lena, por ejemplo, forman parte del grupo de «los más ancianos», los que ya han cumplido 80 años y que, según las previsiones, conformarán el 14,4 por ciento de los alemanes en 2050. Serán menos

KYLE HILTON (*retrato*)

proclives a morir de cáncer o de un ataque cardíaco que las generaciones anteriores. Pero tenderán a padecer más demencia, una enfermedad cada vez más frecuente a medida que aumenta la esperanza de vida, y que lo seguirá siendo a menos que se halle una cura. «En el pasado, la gente simplemente moría antes de contraer alzhéimer. Ahora no es así», explica Axel Börsch-Supan, director del Centro para la Economía del Envejecimiento de Múnich e investigador principal de la Encuesta de Salud, Envejecimiento y Jubilación en Europa, un estudio longitudinal de más de 45.000 europeos con una edad de 50 años o más.

En términos económicos, el envejecimiento de Europa occidental tiene consecuencias muy variadas. No solo se debe a la baja natalidad; también lo ha provocado el notable aumento de la esperanza de vida y de la salud y el bienestar individuales. La gente no solo vive más, sino que se mantiene sana y apta para trabajar durante mucho más tiempo. En las dos décadas pasadas, la esperanza de vida al nacer en Alemania aumentó en casi un lustro, hasta algo más de los 80 años. Los parámetros de salud están mejorando en toda Europa. Como explica Börsch-Supan, la longevidad aumenta de forma lineal, no hay signos de que la curva se sature. (En Estados Unidos, por el contrario, la discusión sobre la deceleración del envejecimiento tiende a oscurecer el dato decepcionante de que la esperanza de vida ha disminuido en ciertos grupos de población, apunta Börsch-Supan.)

En Europa algunos hablan, nada menos, de la necesidad de redefinir el término *senectud*. Sergei Scherbov, demógrafo del Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados de Laxenburg, Austria, sugiere considerar anciana a una persona solo durante los últimos 15 años de vida, lo que se determina a partir del dato de la esperanza de vida al nacer en su país. Esta definición refleja mejor las capacidades y la salud que la proporcionada por la ONU, que considera ancianos a quienes han cumplido los 60. «En los años cincuenta la persona de más edad que escaló el Everest tenía 39 años. Hace poco tiempo lo hizo un japonés de 80 años», explica Scherbov.

En verdad, los sistemas de pensiones se están ajustando en muchos países de Europa. En Alemania, la edad de jubilación, que en la actualidad es de 65 años y cinco meses, se irá elevando gradualmente hasta alcanzar los 67 en 2029. Pero para mantener a personas como los padres de Lena, que viven más de 80 años, la edad de jubilación del país acabará por estar ligada a la esperanza de vida, como ha ocurrido en Noruega y Suecia; un cambio que con toda probabilidad resultará impopular. «La cuestión es que a los europeos les gusta jubilarse temprano. Y eso no es sostenible», explica Börsh-Supan.

TOMAR LAS RIENDAS DEL CRECIMIENTO

Los destinos de Saheed y Lena dependen, en gran medida, de lo que acontezca ahora. Planificando bien el futuro, dicen los demógrafos, Nigeria y Alemania pueden afrontar los cambios de población que se avecinan. La demografía, explica Goldstone, es como la gravedad: debes reconocer su fuerza y actuar en consecuencia. «Si eres capaz de manejar la gravedad, puedes conseguir que los aviones vuelen», comenta. Pero se ha de diseñar bien el aeroplano y pilotarlo con competencia. «Puede haber un Gobierno estable y crecimiento económico a pesar del aumento o la disminución de la población. Pero hay que invertir con sensatez, gestionar bien la economía, educar a la fuerza laboral para que sea más productiva, y planificar la necesidad de prestaciones sociales de los diferentes grupos de edad según va cambiando con el tiempo.»



JOHN MOORE, GETTY IMAGES

LOS DISTURBIOS SOCIALES se han atribuido a menudo a la creciente población juvenil, pero un incremento repentino de trabajadores jóvenes capacitados también podría impulsar la economía.

En cierto modo, Nigeria y Alemania representan dos extremos opuestos de la situación mundial. Entre ambos países se hallan docenas de otros cuyo papel en el globo también cambiará al alterarse la distribución de su población. También cambiará el de Estados Unidos, que crecerá tanto en edad como en población total. Si se interviene ahora en materias como la asistencia médica, las infraestructuras urbanas, la educación, la seguridad alimentaria y las pensiones, los países de todo el mundo podrán asegurar una vida mejor a las generaciones venideras.

Mientras tanto, para mantener la estabilidad mundial será necesario involucrar en mayor medida a las economías emergentes populosas, entre ellas Brasil, China, India y México. Esto significa reconfigurar organismos gubernamentales, como el G-7 y la OTAN, para que reflejen mejor la cara cambiante del mundo y para que aseguren que el dinero fluye hacia los problemas de salud pública, de recursos y de infraestructuras del mundo entero, no solo hacia los de las naciones industrializadas. Si se piensa con creatividad y se actúa pronto y con decisión, la humanidad podría evitar el caos en que puede terminar el crecimiento incontrolado de la población. IyC

PARA SABER MÁS

The new population bomb. Jack A. Goldstone en *Foreign Affairs*, vol. 89, n.º 1, enero/febrero 2010. **www.foreignaffairs.com/articles/2010-01-01/new-population-bomb**

Remeasuring aging. Warren C. Sanderson y Sergei Scherbov en *Science*, vol. 329, págs. 1287-1288, 10 de septiembre de 2010.

Fertility transition: Is sub-saharan Africa different? John Bongaarts y John Casterline en *Population and Development Review*, vol. 38, suplemento n.º s1, págs. 153-168, febrero 2013.

World population prospects: The 2015 revisions: Key findings and advance tables. United Nations Population Division, 2015. **https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/Key_Findings_WPP_2015.pdf**

EN NUESTRO ARCHIVO

La población mundial crece más de lo previsto. Mark Fischetti en *IyC*, marzo de 2015.

Seis mil millones de africanos. Robert Engelman en *IyC*, abril de 2016.







¿RESISTIRÁ LA SOCIEDAD CIVIL LAS ENORMES DIVERGENCIAS ECONÓMICAS?

Angus Deaton

LA AMENAZA DE LA DESIGUALDAD

ANDREW MYERS *(fotografía)*; ANGELA CAMPOS, STOCKLAND MARTEL *(composición)*



Sir Angus Deaton, titular emérito de la cátedra Dwight D. Eisenhower de economía y asuntos internacionales en la Escuela Woodrow Wilson de Asuntos Públicos e Internacionales y en el departamento de economía de la Universidad de Princeton, recibió en 2015 el premio Nobel de economía. Es miembro de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos.

El mundo de hoy está lleno de amenazas. Dos de los grandes baluartes de nuestra reciente prosperidad se hallan en jaque: el proyecto europeo de posguerra y una democracia (razonablemente) robusta en Estados Unidos. Oleadas de refugiados de la guerra civil siria inundan Europa y tensan hasta el punto de ruptura la tradicional generosidad que los europeos del norte han mostrado con quienes padecían dificultades. Somos testigos de los horrores que tienen lugar en el Oriente Próximo, del crecimiento titubeante de China y del calentamiento global. Partes considerables de la población de Europa y de Estados Unidos no han visto apenas crecer su nivel de vida desde hace años, y se están desentendiendo de unos procesos políticos que tan poco les favorecen. Y en el mundo rico, el ritmo del crecimiento per cápita decae, mientras que en casi todas partes las desigualdades en ingresos y en patrimonio aumentan.

Aunque quizá no salte a la vista que la desigualdad merezca un lugar entre esos peligros, sería un error subestimar su potencia. Todos los problemas que he citado están asociados a ella; si bien la desigualdad extrema y creciente no ha causado dicha amenaza, sin duda la empeora.

Puede parecer así que el mundo se está dirigiendo de cabeza al infierno. Sin embargo, no sería razonable extrapolar nuestras perspectivas futuras solo desde el presente. Primero hemos de mirar atrás para ver lo lejos que hemos llegado.

EN SÍNTESIS

La brecha entre ricos y pobres se ha ensanchado en las últimas décadas en muchos países por diversas razones.

No todas las desigualdades de ingresos son socialmente destructivas, pero cuando permiten que pequeños grupos cambien las reglas de la política o de la economía en su favor, es posible que la innovación o el crecimiento desfallezcan.

Es improbable que la sociedad logre una mayor prosperidad sin enfrentarse a la desigualdad de ingresos y sin domeñar el comportamiento dañino que promueve.

Nosotros —me refiero a quienes vivimos en el mundo rico y a muchos de quienes habitan en el pobre— gozamos hoy de una riqueza y salud muy superiores a las de cualquier otra época de la historia.

En la interpretación habitual, «prosperidad» se equipara a poder adquisitivo o bienestar material, que ciertamente son un componente suyo importante. Pero el bienestar humano depende de mucho más. La riqueza material tiene escaso valor si se está muerto o incapacitado, y la buena salud es en sí misma una gran parte del bienestar. La educación contribuye a los ingresos y, por lo tanto, al bienestar material, pero propicia además una vida más fructífera y mejor. Igual que la riqueza material, la salud y la educación forman parte de la prosperidad, también lo hace la libertad (la de participar en la sociedad civil, la de movimientos o la de no padecer discriminaciones, violencias, arrestos arbitrarios y encarcelamientos). Todas estas libertades tienen una mayor vigencia hoy que en cualquier otro momento de la historia.

Si retrocedemos 250 años, hasta la segunda mitad del siglo XVIII, veremos que algunos países estaban empezando a emerger de un pasado en el que la pobreza y la mala salud eran la norma. Durante la mayor parte de la historia han sido muchos los niños que han fallecido antes de cumplir los cinco años. Las plagas y epidemias constituían una amenaza constante. Solo tras la Revolución Industrial y la subsiguiente revolución de la salud se generalizarían el crecimiento económico sostenido y las mejoras en salubridad.

Incluso entonces, la vida fue a mejor solo en unos cuantos países, antes de que poco a poco ocurriese lo mismo en el resto del mundo. El progreso creó nuevas desigualdades y alejó el nivel de vida de Londres y Ámsterdam del de Yakarta y Pekín; se incrementó la esperanza de vida y disminuyó la mortandad infantil en el noroeste de Europa, pero no cambiaron en África y Asia. Los rescoldos de esta «gran divergencia» perduran hoy en día, aun tras el notable crecimiento que ha acercado a India y a China a los países ricos, y pese al aumento, todavía más notable, de la esperanza de vida en los países pobres. La renta per cápita es hoy en Estados Unidos cuatro veces la de China, diez la de India o Nigeria, casi veinte la de Kenia y más de noventa la de la República Centroafricana (tales cifras se han ajustado para tener en cuenta el menor coste de la vida en los países pobres). Estas grandes desigualdades internacionales han surgido a causa del progreso: casi siempre algunos se benefician antes que otros. Pero también ponen en riesgo el progreso futuro.

Resulta improbable que los historiadores lleguen a concordar sobre los motivos que desencadenaron la Revolución Industrial, pero sin duda la Ilustración fue una precursora esencial, sobre todo su noción de «conocimiento útil». Este arranca de la interpretación de la naturaleza y del desarrollo de la ciencia básica, y convierte la ciencia en técnicas, máquinas y conceptos que mejoran la vida y empujan a «perseguir la felicidad». Los nuevos conocimientos no caen sin más del cielo; el entorno social y las necesidades de la época influyen hondamente en el ritmo y dirección de los avances. Los mercados también desempeñan un papel. Los precios altos de los bienes incentivan que se ahorre, y una manera de conseguirlo es inventar nuevas formas para reducir su uso. Los altos salarios que había en Gran Bretaña antes de la Revolución Industrial fueron seguramente uno de los factores que fomentaron los métodos que constituirían el núcleo de la revolución.

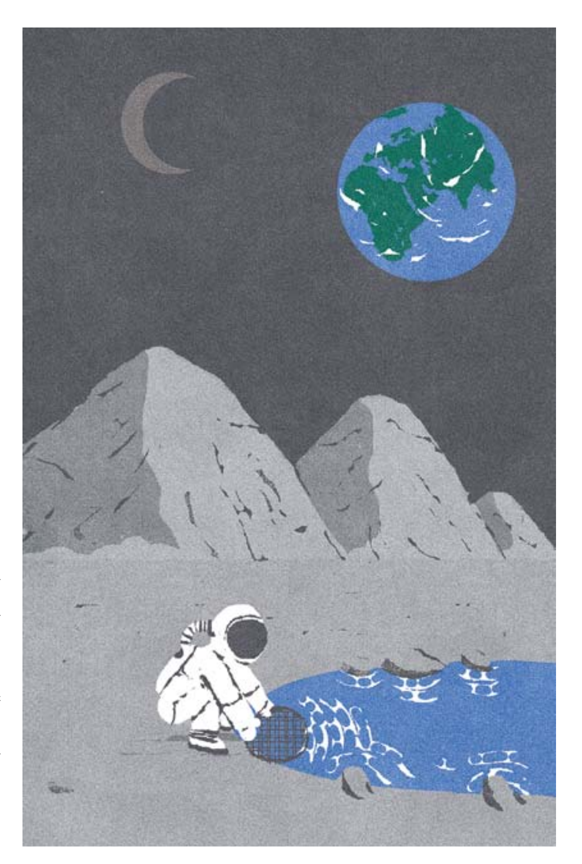
La libertad política e intelectual también nos ayudó a prosperar. Los inventos suelen funcionar por medio de lo que Joseph Schumpeter llamó «destrucción creativa». Las técnicas novedosas no solo destruyen las formas anteriores de hacer las cosas, sino también las de ganarse la vida de quienes se sustentaban gracias a esos métodos antiguos. Al cambio se opondrá una resistencia ardiente, la cual a menudo vencerá, sobre todo si los afectados son políticamente poderosos. No obstante, las disposiciones políticas pueden modificar esa resistencia. Una razón de que hubiera crecimiento continuado en Europa y no en China es que la fragmentación política de Europa permitió que quienes tenían ideas —o religiones— nuevas pero impopulares huyesen de una jurisdicción política y se estableciesen en otra. La reciente globalización ha conllevado una mayor libertad de movimiento de bienes, servicios y (en menor medida) personas, lo que ha contribuido a que India y China hayan escapado en gran parte de la pobreza en los últimos tiempos.

La cuestión hoy es saber si el crecimiento habido desde 1750 continuará indefinidamente o si las negras nubes que nos rodean no serán una señal de que hemos llegado a un fin, de que el pozo se ha secado. Solo porque la historia del último cuarto de milenio haya sido de progreso (aunque con algunas interrupciones horribles), no podemos dar por supuesto que se mantendrá forzosamente tal tendencia. En el pasado ya hubo otros episodios de progreso que luego se extinguieron.

No creo que la desigualdad resulte dañina por sí misma; mi bienestar no cambia simplemente porque a otro le vaya mejor o peor. La desigualdad es a veces solo otra palabra para referirse a los incentivos. Aquellos cuyas innovaciones hacen que estemos mejor son recompensados a menudo con grandes riquezas, y cuesta ver por qué ello tendría que resultar socialmente destructivo por sí mismo. Los peligros de la desigualdad residen en sus efectos instrumentales, que son los que amenazan nuestro futuro.

El ritmo del crecimiento económico per cápita, desde hace tiempo algo inferior al 2 por ciento anual en Estados Unidos, ha estado cayendo. Declives similares se observan en otros países industriales. Ya era así antes de la crisis económica que empezó en 2008, cuya recuperación dista mucho de ser completa en los Estados Unidos y no se ha producido en absoluto en buena parte de Europa. Puede que la Gran Recesión represente solo uno de esos episodios dañinos que de vez en cuando aquejan a las economías de mercado. O podría ser algo peor: una señal de lo que se avecina.

El crecimiento per cápita del PIB, aunque sea una medida imperfecta, se mantiene como principal indicador de una prosperidad que aumenta. A un 3 por ciento anual, el PIB se dobla en 25 años, o en una generación; a un 2 por ciento, tarda 35 años; y con un 1 por ciento, 70 años. Los estadounidenses y muchas familias europeas de la mitad de la distribución ya han perdido la oportunidad de que les vaya mejor que a sus padres; muy al contrario, se las ven y se las desean para que



LORENZO GRITTI (*ilustración*); KYLE HILTON (*retrato*)

¿CUÁNDO Y DÓNDE ENCONTRAREMOS VIDA EXTRATERRESTRE?

«Si la vida microbiana abunda en Marte, mi impresión es que la hallaremos dentro de veinte años, siempre que se parezca lo suficiente a nuestra forma de vida. Si es muy diferente de la que tenemos en la Tierra, resultará difícil detectarla. También es posible que los microbios marcianos que pueda haber no abunden y vivan en lugares a los que le cueste llegar a un vehículo de aterrizaje robótico. Las lunas Europa y Titán ofrecen más promesas. Europa es un mundo acuático donde podrían haber evolucionado formas complejas de vida. Y Titán es probablemente el sitio más interesante del sistema solar para buscar vida. Es rico en moléculas orgánicas, pero muy frío y no tiene agua líquida: si hay vida en Titán, será muy diferente de la terrestre.»



CAROL E. CLELAND *es catedrática de filosofía y coinvestigadora del Centro de Astrobiología de la Universidad de Colorado en Boulder*

no les vaya peor. La política resulta más difícil con un crecimiento más lento. Con un pastel creciente, todos pueden tener más, pero si el pastel no cambia, solo me puedo beneficiar a expensas de otros. Lo mismo vale para bienes públicos como la asistencia sanitaria, las pensiones, la educación y las infraestructuras. Con crecimiento, estos bienes se pueden restañar y expandir sin reducir lo que le toca a nadie; sin él, alguien tiene que ceder parte de lo que ya tiene.

El crecimiento lento favorece la formación de grupos que enriquecen a sus miembros a expensas de la mayor parte de la población, cosa que pueden lograr, por ejemplo, con campañas a favor de leyes y regulaciones que incrementen sus ingresos, o que les ofrezcan algún otro tipo de protección, lo que inhibe la innovación y los cambios beneficiosos y reduce aún más el crecimiento. Estas actividades son lo que los economistas llaman «captación (o búsqueda) de rentas» (*rent-seeking*). El pensador económico y político Mancur Olson creía que la captación de rentas haría decaer a las naciones ricas. No cuesta hallar ejemplos hoy en día. Por mencionar solo uno entre muchos, los Institutos Nacionales de la Salud, una de las instituciones dedicadas a la investigación más importantes del Gobierno de Estados Unidos, declaraban en 2015, conminados por un Congreso bien financiado por el sector sanitario y muy opuesto al Obamacare (la reforma encaminada a que toda la población tenga acceso a la asistencia médica), que no pagaría investigaciones cuyo fin primario fuese «evaluar el coste y la eficiencia» del sistema sanitario.

Cuando el crecimiento no se comparte, surgen nuevos problemas. Los que se quedan atrás quizá mantengan la paciencia mientras les toque algo, pero si sus ingresos no aumentan o incluso bajan, es improbable que la conserven durante mucho tiempo. La desigualdad se convierte en un asunto político. Idealmente, esa insatisfacción provocaría un cambio político. Pero cuando el sistema político solo es sensible a las necesidades de los pudientes —y cabe argüir que el Congreso de Estados Unidos se comporta así—, se tiene una amenaza directa contra la estabilidad política y, en última instancia, contra la democracia. Si los partidos políticos principales no ofrecen nada a los excluidos, estos quizá recurran a remedios políticos o a candidatos que pongan en riesgo la democracia liberal.

Para quienes se quedan atrás, la pérdida de bienestar dista de ser algo abstracto. En Estados Unidos, los que se hallan en la mitad de la distribución de la renta no solo han visto estancarse sus ingresos: hay ahora una crisis de salud entre los blancos de clase media no hispanos, que se están autodestruyendo a causa de la drogadicción, los suicidios y el alcoholismo. El aumento de la esperanza de vida de los años recientes se ha acumulado sobre todo en los que se hallan en la parte alta de la distribución de la renta.

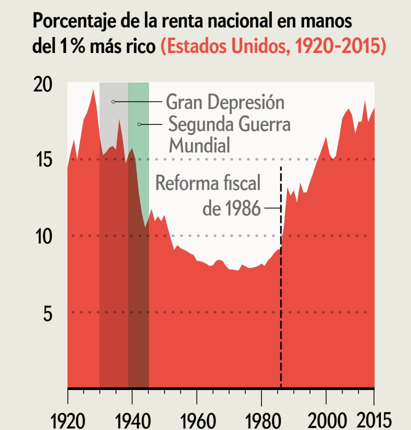
Conocer los motivos de la desaceleración económica resulta esencial cuando se quiere pensar en el futuro. A pesar de las fuertes discrepancias al respecto, existen algunas razones directas de por qué crece-

DISPARIDAD DE INGRESOS

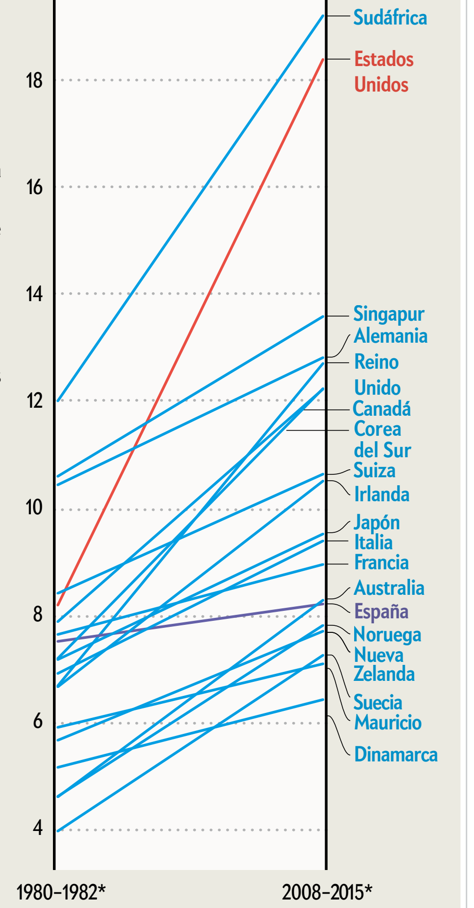
Una brecha que se ensancha

Las grandes diferencias entre los ingresos económicos de unos y de otros no son socialmente destructivas por sí mismas, pero están alimentadas por actuaciones en beneficio propio —y, a su vez, generan otras nuevas de esa misma índole— por parte de grupos bien situados que quieren incrementar sus ganancias a expensas tanto del crecimiento económico como de la gobernanza democrática. Limitar esos efectos perniciosos (por ejemplo, mediante la subvención de programas que ayuden a quienes se quedan detrás) va siendo más difícil a medida que la desigualdad aumenta. Como indican estos diagramas, la desigualdad de ingresos se ha incrementado mucho en las últimas décadas en Estados Unidos, y a un ritmo muy superior al de otros países.

Porcentaje de la renta nacional en manos del 1 % más rico (Estados Unidos, 1920-2015)



Porcentaje de la renta nacional en manos del 1 % más rico



* *No se dispone de información anual para todos los países. Los datos mostrados son los más recientes de que se dispone dentro del intervalo indicado. Excluyen las ganancias de capital.*

FUENTE: *THE WORLD WEALTH AND INCOME DATABASE*. FACUNDO ALVAREDO, ANTHONY B. ATKINSON, THOMAS PIKETTY, EMMANUEL SAEZ Y GABRIEL ZUCMAN; DATOS DEL 6 DE JULIO DE 2016 WWW.WID.WORLD; TIFFANY FARRANT-GONZALEZ

mos con tanta lentitud, y todas tienen que ver con el aumento de la desigualdad. En Estados Unidos, aunque menos que en otras partes, se gastan sumas enormes en la asistencia sanitaria, buena parte de las cuales sirve de poco o nada. Ese dinero sale de los salarios y de otros ingresos, así que los ciudadanos pagan más por la atención sanitaria de lo que creen. Defienden ardientemente este sistema aquellos cuyos ingresos y poder proceden directa o indirectamente de esa casi quinta parte del PIB estadounidense que la asistencia sanitaria absorbe.

Aunque el sector financiero es otra pieza clave de nuestro bienestar, también es demasiado grande. Las enormes remuneraciones privadas que genera superan los beneficios sociales que reporta. Muchos de nuestros mejores cerebros trabajan en ese sector en vez de producir bienes o de desarrollar nuevos tratamientos médicos. Al mismo tiempo, la inestabilidad de un sector financiero demasiado grande supone el riesgo de que haya crisis financieras, las cuales tienen unos efectos negativos desastrosos para el crecimiento económico.

El tamaño mismo de los sectores sanitario y financiero les da un poder político que hace difícil que se los controle. Se han convertido en motores de la desigualdad; generan remuneraciones inmensas para algunos mientras frenan el crecimiento y socavan la innovación.

Si este análisis es correcto, será improbable que restauremos la prosperidad sin enfrentarnos a la desigualdad de ingresos y sin domeñar comportamientos como la captación de rentas, que son a la vez causa y consecuencia de esa desigualdad. Como el emperador chino del siglo xv que, por miedo a ceder poder a otros, prohibió las exploraciones marinas que podrían haber conquistado el mundo, corremos el riesgo de sofocar la innovación y el crecimiento, las raíces de nuestra prosperidad futura.

Un indicio de que la desigualdad resultará difícil de corregir es el hecho de que está aumentando de forma generalizada en los países ricos, pese a las diferencias entre las políticas nacionales y pese a las activas políticas de bienestar social de algunos países que intentan limitarla. Inquieta que el progreso técnico, la automatización, la globalización y el traslado de puestos de trabajo a otras naciones no hayan tenido el efecto que se esperaría de desplazar a los trabajadores temporalmente; esto es, que a largo plazo, ellos también, o al menos sus hijos, acaben beneficiándose de la mayor prosperidad que esas fuerzas puedan traer. En lugar de ello, esos cambios parecen haber creado un proceso en el que las ganancias nunca llegan, o nada más van a parar a extranjeros o a los propietarios de las máquinas. Preocupaciones así se han suscitado a lo largo de la historia en situaciones similares, y siempre se ha demostrado que eran infundadas, así que habremos de poner mucho cuidado en interferir, si es que creemos, según mi opinión, que el avance técnico es el fundamento de que la prosperidad crezca y nuestras vidas se alarguen. Tampoco cabe duda de que, en la estela de la muy prolongada Gran Recesión, resulta fácil ser pesimista. Dicho esto, los temores son reales, y desde hace muchos años los economistas no habían estado tan preocupados.



CHRISTOPHER FURLONG/*GETTY IMAGES*

LOS QUE SE HAN QUEDADO ATRÁS: Entre quienes votaron en junio a favor de que el Reino Unido abandonase la Unión Europea, muchos percibían que los supuestos beneficios de pertenecer a esta habían pasado de largo ante ellos o estaban reservados para otros.

¿Qué factores positivos hay que compensen semejante pesimismo? Uno es que la democracia ganará al final, que quienes hoy no están bien representados se valdrán del proceso democrático para aupar a líderes que respondan más a su voluntad. Resultará difícil, y por el camino la democracia correrá riesgos, pero no imposible.

El segundo y más poderoso rayo de esperanza nace de la historia con que empecé: la gente amolda las circunstancias a sus necesidades, al menos a largo plazo. No es como si un planeta errante se acercase a la Tierra y amenazara con destruirla. Las maneras en que está conformada la sociedad se pueden cambiar, y necesitarán que se las modifique. Creo que, si no se atajan, los actuales niveles de captación de rentas y los consiguientes extremos de desigualdad nacionales e internacionales probablemente harán que decaigamos. Sin embargo, soy optimista, porque perseguir la felicidad sigue siendo hoy un deseo tan poderoso como en el siglo xviii. IyC

PARA SABER MÁS

A surge in inequality. Lester C. Thurow en *Scientific American*, mayo de 1987.
Rent seeking. David R. Henderson en *The Concise Encyclopedia of Economics* (segunda edición). Liberty Fund, 2007. **www.econlib.org/library/Enc/RentSeeking.html**
Growing unequal? Income distribution and poverty in OECD countries. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, octubre de 2008. **http://www.oecd.org/els/soc/growingunequalincomedistributionandpovertyinoecdcountries.htm**
El gran escape: Salud, riqueza y los orígenes de la desigualdad. Angus Deaton. Fondo de Cultura Económica de España, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Medir la desigualdad. Juan M. R. Parrondo en *IyC*, septiembre de 2006.

por Marc Cortés Fargas, Silvia González García y Jaime Juan Muñoz

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Un globo hasta la estratosfera

Con pocos recursos, un equipo de estudiantes ha construido y lanzado una sonda para obtener datos e imágenes a elevadas altitudes

La estratosfera, una de las cinco capas de la atmósfera terrestre, se extiende entre los 10 y los 50 kilómetros de altitud. A tales cotas, el aire tiene una densidad del 7 por ciento de su valor al nivel del mar, alcanza temperaturas de hasta –55 grados centígrados y la presión es prácticamente la del vacío.

Para su estudio se precisan sistemas adaptados, tanto térmica como estructuralmente, que soporten las condiciones extremas descritas anteriormente. También se necesita un medio impulsor que permita llegar a tales altitudes, unas tres o cuatro veces superiores a la alcanzada por un avión comercial.

Dentro del Programa Espacial de la Universidad Politécnica de Cataluña, el proyecto NESLAB (acrónimo de Near Space Laboratory), desarrollado por estudiantes, tiene como objetivo diseñar, construir y lanzar sondas para realizar experimentos de observación de la Tierra y del espacio. En concreto, se centra en los globos de alta altitud, que incorporan un módulo de sondeo y telemetría. Este permite obtener datos de la atmósfera, como la temperatura y la concentración de gases a distintas alturas, y a la vez conocer la localización del globo a lo largo de su trayectoria. El módulo incorpora también cámaras que captan imágenes y registran vídeos durante el vuelo.

En los experimentos del proyecto, el globo utilizado es de látex y el medio impulsor es helio. En cuanto a la protección del módulo electrónico, tras el estudio de diferentes materiales, hemos concluido que el poliisocianurato presenta mejores resultados que otros materiales más tradicionales, como el poliestireno expandido, debido a su inferior conductividad térmica.

El sistema de telemetría desarrollado es uno de los aspectos técnicos destacados. Incorpora tres métodos independientes: uno es bidireccional y utiliza la red de satélites Iridium (que proporciona cobertura mundial), el segundo se basa en la comunicación por radio y el último emplea la mensajería de texto por telefonía móvil. Las cuatro cámaras que viajan dentro del módulo son «deportivas» (AEE S40 PRO), porque consumen menos energía que otros modelos con mejores prestaciones y permiten obtener imágenes a las temperaturas y presiones extremas indicadas.

Uno de los lanzamientos de prueba lo realizamos en abril de 2016 desde Arbeteta (Guadalajara). El módulo lo recuperamos unas dos horas después cerca de Teruel. Junto con los datos de la atmósfera obtuvimos fotografías espectaculares. La ausencia de nubes en la estratosfera y la baja densidad del aire permitieron captar imágenes en las que se aprecia la curvatura terrestre y el contraste de las diferentes capas de la atmósfera.

—Marc Cortés Fargas
—Silvia González García
—Jaime Juan Muñoz
Escuela Superior de Ingenierías Industrial, Aeroespacial y Audiovisual de Tarrasa
Universidad Politécnica de Cataluña



PREPARACIÓN del globo estratosférico antes de su lanzamiento, en la provincia de Guadalajara.



EL MÓDULO de telemetría, aquí a 2 kilómetros de altura sobre la provincia de Teruel, fue protegido con una cubierta de poliisocianurato.

SECCIÓN de la Tierra capturada a 30 kilómetros de altura donde se aprecia su curvatura.

PANORÁMICA captada al traspasar la barrera de nubes, a 5 kilómetros de altura. (Esta fotografía ganó el concurso internacional *Global Space Balloon Challenge*.)



por Antonio Diéguez

Antonio Diéguez es catedrático de filosofía de la ciencia en la Universidad de Málaga.



Transhumanismo: entre el mejoramiento y la aniquilación

El transhumanismo busca el mejoramiento humano mediante la tecnología. Las promesas que se hacen en su nombre son muy ambiciosas, pero no todas están igualmente justificadas

A medida que el ser humano ha ido transformando el mundo con la tecnología, se ha ido también transformando a sí mismo. Su relación con la tecnología no es, pues, accidental, sino constitutiva. En este sentido, puede decirse que el ser humano es el primer bioartefacto; un producto de su propia tecnología. A lo largo de los siglos, este poder de transformación estuvo fundamentalmente en manos de técnicas culturales como la escritura, la educación, las leyes y el Estado, pero también desempeñaron un papel central las de tipo biológico, como los procedimientos agrícolas y ganaderos tradicionales o las técnicas de procesamiento, conservación y utilización de alimentos. Un efecto claro de estas últimas se manifiesta en el hecho de que ciertas poblaciones humanas han adquirido evolutivamente la capacidad para digerir la lactosa en edad adulta [*véase* «Genes, cultura y dieta», por Olli Arjamaa y Timo Vuorisalo; Investigación y Ciencia, junio de 2010].

Todas estas tecnologías han ido conformando al ser humano de forma lenta e indirecta. Modificaban primero su entorno cultural o natural, su circunstancia vital; esto producía a su vez cambios en los individuos y finalmente en la propia condición humana. En el siglo xx, sin embargo, el progreso técnico ha abierto una senda que en el pasado estuvo solo en la imaginación de algunos literatos y visionarios: se ha vuelto factible la posibilidad de aplicar la tecnología a la transformación directa del ser humano. El transhumanismo no es más que el reconocimiento complacido de que esta posibilidad está ya ahí, y la afirmación de que debe ponerse a nuestro alcance. Dentro de este heterogéneo movimiento cultural, filosófico y social, algunos son lo suficientemente radicales como para anhelar la superación (y desaparición) de la especie humana y su sustitución por una o varias especies posthumanas, que serían sus herederas evolutivas. Otros no quieren llegar a tanto. Se conforman con buscar mejoras dentro de unos límites que nos dejarían aún seguir siendo humanos.



MENNO VAN DIJK/ISTOCKPHOTO

La diversidad es tal que no todos los que se dejan incluir bajo el apelativo de transhumanista o posthumanista ven las cosas del mismo modo en lo que al significado de este término se refiere. Hay un transhumanismo cultural, desarrollado especialmente por corrientes feministas y por la llamada «filosofía continental», que busca ante todo subvertir los ideales del humanismo moderno, centrados en una visión del ser humano que se considera sesgada sexual, racial y culturalmente. Sus pretensiones de universalidad no habrían hecho más que imponer un estereotipo humano que ha resultado ser un elemento de opresión más que de liberación; un recurso para dividir. Hay, pues, que romper las viejas dicotomías que este estereotipo fundó o de las que bebió (masculino/femenino, animal/humano, viviente/máquina, natural/artificial). El transhumanismo cultural toma como icono de esta superación el cíborg, que no tendría sexo ni se atendría a límites entre lo vivo y lo inerte, entre lo natural y lo artificial. El cíborg no tiene identidad fija. Su condición es múltiple y cambiante. Es, pues, una referencia contra la pureza y las fronteras identitarias permanentes. Donna Haraway, filósofa de la Universidad de California y autora del *Manifiesto cíborg* (1985), es la pensadora más influyente en esta orientación.

No obstante, la modalidad que ha alcanzado mayor difusión en las redes y en los medios de comunicación es el transhumanismo tecnocientífico. Este es menos crítico política y socialmente, y mucho más tecnófilo que el anterior. Sus esperanzas están puestas en el potencial creador y controlador que abren las nuevas tecnologías actuando de forma conjunta; en particular, las nanotecnologías, las biotecnologías, las tecnologías de la información (computación) y las ciencias cognitivas (neurociencias, inteligencia artificial, etcétera), a las que suelen hacer mención de forma conjunta con las siglas NBIC. Por el momento, las orientaciones más activas dentro de esta modalidad

de transhumanismo han sido dos: la de los que ven en la inteligencia artificial el resorte fundamental del cambio radical previsto y la de los que confían más en la biotecnología para dar ese enorme salto —aunque, por supuesto, cabe combinar ambas orientaciones.

Lo que de común tienen ambas versiones del transhumanismo tecnocientífico es su búsqueda del mejoramiento humano mediante procedimientos tecnológicos, y ello con vistas a un alargamiento indefinido de la duración de la vida. En otros términos, su objetivo final es la victoria sobre la muerte, que no es tenida como un destino inexorable, sino como un enemigo que puede ser derrotado. No hay que buscar una vida más allá de ella, como hacen las religiones. Lo que hay que hacer es no morir jamás, y la tecnología podrá obrar el milagro.

Esto explica la popularidad que este transhumanismo está alcanzando y que ya se considere por algunos el sustituto perfecto de la religión en una época de descreimiento. Situándose entre lo real y lo imaginario, el transhumanismo pretende no solo cambiar en el futuro al ser humano, sino, antes que eso, modificar sus valores, sus conceptos y sus prácticas actuales. El anuncio de la nueva era funciona como una llamada a la movilización para preparar su advenimiento. Hemos de tomar las riendas de nuestra evolución; liberarnos de la lotería genética y de los rigores de la selección natural que la han conducido hasta ahora. La libertad morfológica, el derecho a elegir el fenotipo que se quiera tener, debe ser una norma fundamental de esa nueva era que ya llega.

Entre los que apuestan por la creación de una superinteligencia artificial que tome el control de nuestro planeta y de nuestras vidas y con la cual podamos integrarnos, el más conocido es el ingeniero de Google y escritor prolífico Raymond Kurzweil, que ha hecho correr la idea de que la «singularidad», es decir, la creación de máquinas superinteligentes capaces de crear nuevas máquinas aún más inteligentes en un crecimiento exponencial, hasta que tomen ellas el control de todo el planeta, se producirá en torno al año 2045. Nick Bostrom, filósofo de la Universidad de Oxford, ha analizado con más detalle los pros y los contras de la creación de una superinteligencia artificial. Se detiene sobre todo en los procedimientos mediante los que se podría impedir que esta fuera hostil a los humanos. Las conclusiones a las que llega no son muy halagüeñas.

La transformación más radical, la forma más invasiva de perpetuación a la que algunos esperan poder recurrir, es el volcado de la mente en un superordenador; idea defendida por Hans Moravec, investigador en robótica de la Universidad Carnegie Mellon, y por Kurzweil, entre otros. No sorprende que haya sido también la propuesta más criticada por los escépticos, incluidos algunos transhumanistas. No solo es muy dudoso que tenga algún sentido desde un punto de vista científico-técnico y filosófico —asume una concepción de la mente como *software* que es sumamente discutible—, sino que, de tener éxito alguna vez, lejos de constituir la consecución de la inmortalidad personal, sería probablemente una forma horrible de acabar con uno mismo, transformado en algo que sería imposible de identificar con el ser que habríamos sido hasta entonces. Aunque no busquen la inmortalidad, sino el fin más modesto de alargar nuestra vida, más posibilidades de éxito tienen los estudios científicos que se vienen realizando en las últimas décadas sobre las causas del envejecimiento, entre los que destacan los trabajos de María A. Blasco, del Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas, y Carlos López Otín, de la Universidad de Oviedo. Y esto nos lleva a la segunda modalidad de transhumanismo tecnocientífico que mencionábamos.

Quizás el momento en el que el transhumanismo de orientación biológica comenzó a adquirir la relevancia filosófica que hoy tiene fue cuando, en 1999, el filósofo de la Escuela de Arte y Diseño de Karlsruhe Peter Sloterdijk presentó su conferencia «Normas para el parque humano». Esta desató una dura polémica entre el autor y algunos discípulos del sociólogo y filósofo Jürgen Habermas, con intervención final de este. Sloterdijk tuvo el atrevimiento —para el ambiente político y cultural alemán— de sostener que el proyecto humanista de «domesticación» del ser humano mediante la educación, la lectura de los clásicos, el cultivo de las artes, etcétera, había sido un completo fracaso y, por tanto, era necesario comenzar a ensayar otros métodos más expeditivos y rápidos si no queríamos presenciar en poco tiempo nuestra autodestrucción. El remedio que él sugería habría de venir a través de una «antropotécnica» capaz de dirigir «con una política de cría» la reproducción humana; o, dicho de forma más transparente, a través de la eugenesia y de la manipulación genética de nuestra especie.

Los defensores del biomejoramiento humano no se sitúan muy lejos de esas tesis. El surgimiento de la biología sintética y los éxitos logrados recientemente con la técnica de edición genética CRISPR/Cas9 han dado un enorme impulso a sus planteamientos. La biología sintética ha potenciado de forma sorprendente las posibilidades de la ingeniería genética «clásica». Ha permitido fabricar en el laboratorio genes diseñados para fines específicos, capaces de hacer que las células adquieran funciones que no poseen en la naturaleza. En el futuro, dichos genes podrían estar constituidos por nuevos tipos de nucleótidos o hallarse sometidos a un código genético diferente. Las aplicaciones posibles al ser humano son aún en buena medida desconocidas, pero ya se ha iniciado la investigación sobre ello. A buen seguro habrá muchas positivas, junto a otras, en cambio, amenazantes.

En qué medida todas estas propuestas van a resultar efectivas y qué consecuencias tendrán sobre nuestras vidas es algo que solo el tiempo podrá determinar con seguridad. Pero cuando se trata de técnicas que pueden propiciar cambios tan drásticos, no sería mala idea que, antes (o además) de preguntarnos cuál sería la relación costes/beneficios de su aplicación, nos detengamos a considerar por qué habríamos de desear las transformaciones propuestas —o por qué se nos intenta convencer de que son realmente tan deseables, y, al parecer, inevitables.

PARA SABER MÁS

Regenesis: How synthetic biology will reinvent nature and ourselves. G. M. Church y E. Regis. Basic Books, 2012.
¿Decisiones peligrosas? Una bioética desafiante. J. Savulescu. Tecnos, 2012.
Superinteligencia: Caminos, peligros, estrategias. N. Bostrom. Teell Editorial, 2016.
Transhumanismo. La búsqueda del mejoramiento humano. A. Diéguez. Herder (en prensa).

EN NUESTRO ARCHIVO

Moldeados por la tecnología. Ricard V. Solé, *en este mismo número*.
Más que humanos. Hillary Rosner, *en este mismo número*.

por Joan Gavaldà



Joan Gavaldà es médico adjunto del Servicio de Enfermedades Infecciosas del Hospital Valle de Hebrón y coordinador del Laboratorio de Investigación de Enfermedades Infecciosas del Instituto de Investigación Valle de Hebrón, en Barcelona.

La crisis de los antibióticos

El auge de la resistencia a estos fármacos supone una amenaza global que exige una respuesta decidida

El acceso a los antibióticos es esencial en todos los sistemas de salud. Su uso ha reducido la mortalidad infantil, ha incrementado la esperanza de vida y se ha convertido en indispensable en cirugía y en algunos tratamientos de la medicina moderna. Logros que hoy damos por garantizados, como el incremento de la seguridad en los partos complicados, la mejoría en el pronóstico de los niños prematuros, las intervenciones quirúrgicas, el tratamiento de infecciones como la neumonía, el trasplante de órganos y la quimioterapia del cáncer, no habrían sido posibles sin los antibióticos. Sin embargo, numerosos microorganismos patógenos han desarrollado resistencia a estos fármacos, por lo que muchos pacientes fallecen porque no responden a ellos. La celebración del Día Europeo para el Uso Prudente de los Antibióticos el 18 de noviembre es una buena ocasión para reflexionar sobre este problema y sobre cómo afrontarlo.

La resistencia antibiótica representa una amenaza global que afecta a diferentes ámbitos económicos, sociales y de salud pública en todo el mundo. El Foro Económico Mundial la considera una de las amenazas sanitarias y económicas más importantes de la sociedad. No solo resulta costosa en términos de sufrimiento humano, sino también en términos monetarios. En la Unión Europea, cada año se diagnostican 400.000 casos nuevos de infecciones por bacterias multirresistentes, las cuales conllevan 2.500.000 días adicionales de estancias hospitalarias. Actualmente, cerca de 50.000 personas fallecen cada año en Europa y EE.UU. a causa de estas bacterias. Los costes derivados de la resistencia a los antibióticos se estiman en más de 5000 millones de euros en las dos zonas juntas. En todo el mundo, el número anual de defunciones asciende a 700.000. Se cree que, si no se controla, la resistencia puede llegar a provocar, en un futuro próximo, 10 millones de muertes anuales, una cifra superior a la de muertes por cáncer.

El incremento de la resistencia puede atribuirse a cuatro grandes causas. La primera es el abuso y mal uso de los antibióticos, tanto si se utilizan en humanos como en el ganado. Su empleo masivo en los animales con el fin de tratar o prevenir enfermedades y como fármaco de engorde es, probablemente, una de las razones más importantes del aumento de la resistencia. La segunda es la diseminación de las bacterias multirresistentes, la cual se ha visto favorecida



por los desplazamientos frecuentes de las personas en el mundo globalizado en el que vivimos. La tercera causa radica en la ausencia de técnicas de diagnóstico rápido para identificar este tipo de infecciones o, lo más importante, para descartar la administración de antibióticos en las infecciones por virus respiratorios. Y un último factor apunta a la disminución en los últimos años del desarrollo de nuevos antibióticos, una situación paradójica teniendo en cuenta el ascenso de la resistencia. Ello se atribuye a que las empresas farmacéuticas han dirigido su esfuerzo a otros productos, como los medicamentos contra el cáncer o los antiinflamatorios, porque resultan más rentables que los antibióticos, que cada vez deben ser más selectivos y se administran durante poco tiempo.

La aparición y propagación de la resistencia implica graves problemas médicos, sociales y económicos que urgen a tomar medidas globales y coordinadas. De manera genérica, existen una serie de acciones que deben emprenderse: mejorar la concienciación social sobre el empleo de los antibióticos y el riesgo que conlleva el aumento de la resistencia; fomentar el uso racional de los antibióticos en todos los entornos; implementar medidas de control de infecciones en los centros de atención sanitaria y granjas; y promover la investigación en ámbitos como la vigilancia y prevención de la resistencia, el desarrollo de pruebas de diagnóstico rápido y la creación de nuevas estrategias antimicrobianas y no antimicrobianas.

Para gestionar la crisis de la resistencia antibiótica, varias organizaciones y administraciones clave, además del Foro Económico Mundial, han publicado informes y han llevado a cabo acciones de gran visibilidad. La OMS (mayo de 2014), el ex Primer Ministro David Cameron (julio 2014), el Presidente Obama (septiembre de 2014) o el G-20 (2016) han reconocido la naturaleza global del desafío planteado por la resistencia y han hecho un llamamiento local e internacional para que se lideren y coordinen acciones para hacer frente a su ascenso. Asimismo, por cuarta vez en su historia, la Asamblea General de las Naciones Unidas, celebrada este pasado mes de septiembre, firmó una declaración para coordinar a los Estados miembros frente a esta amenaza económica y sanitaria.

La diseminación de las bacterias multirresistentes puede llevar la medicina moderna a una situación dramática, similar a la oscura era preantibiótica. Las medidas decididas de los organismos responsables, tanto locales como nacionales e internacionales, además de la reacción de toda la sociedad pueden impedir esa perspectiva tan sombría.

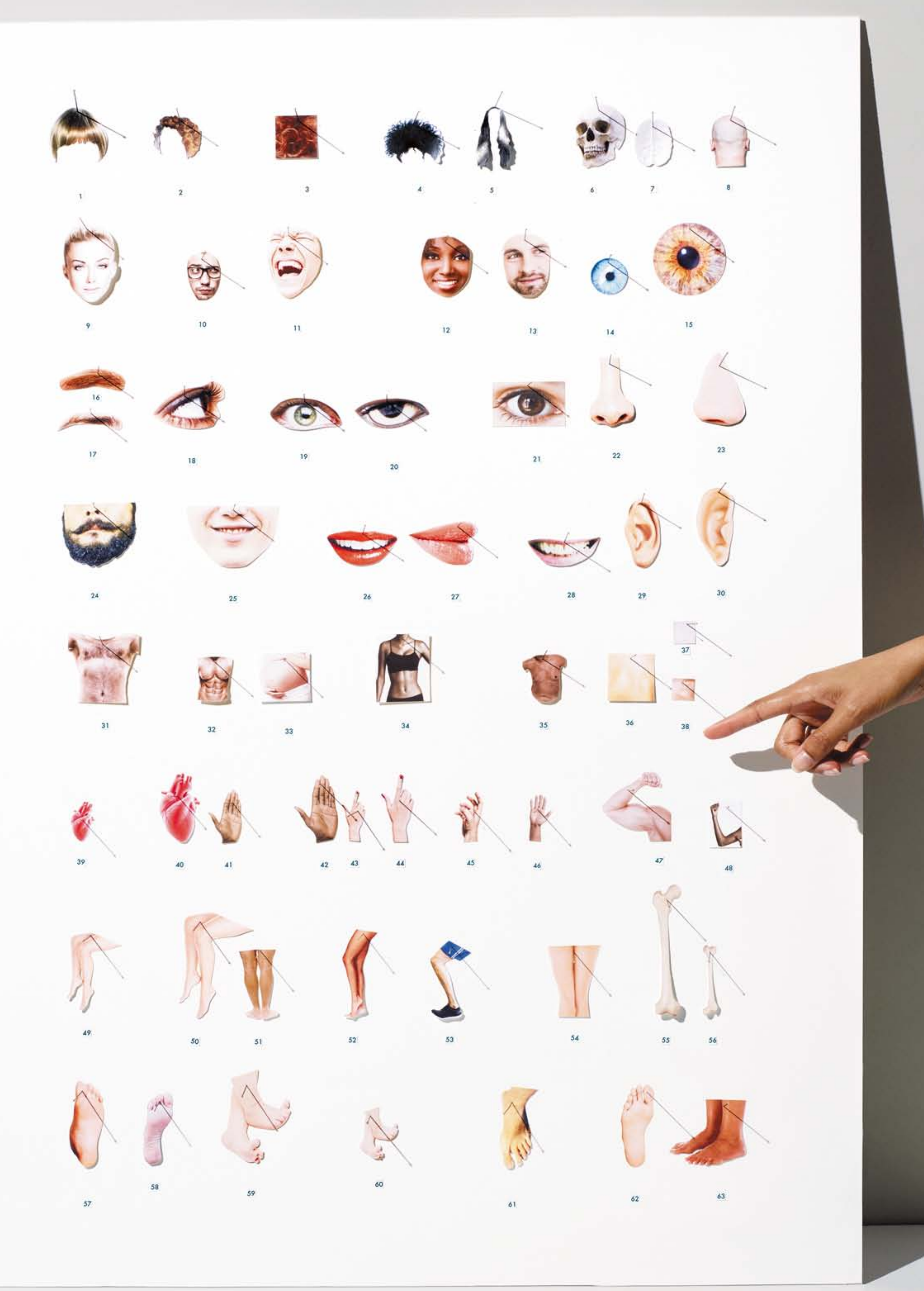


¿LLEGAREMOS A CONTROLAR NUESTRO DESTINO GENÉTICO?

Stephen S. Hall

MODIFICAR NUESTRA HERENCIA

ANDREW MYERS (*fotografía*); ANGELA CAMPOS, STOCKLAND MARTEL (*composición*)


1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63



Stephen S. Hall es un laureado escritor científico. Autor de seis libros, entre ellos relatos sobre el ADN recombinante y la inmunoterapia contra el cáncer, imparte clases de comunicación científica en la Universidad de Nueva York.

Kyle Orwig ansía hacer un experimento que, en sus propias palabras, «cabrearía a la gente». Catedrático de la Universidad de Pittsburgh, Orwig es un experto en la intrincada biología de los espermatozoides; en concreto, en cómo ciertas células madre del testículo los producen por millones. De vez en cuando, empero, un defecto genético impide que el proceso se complete, lo que condena al individuo a la esterilidad. El experimento que corre por su cabeza consiste en reparar ese defecto de las células madre testiculares mediante técnicas de edición genética y reimplantarlas después en ratones infértiles. Con ello demostraría que tal vez se pueda remediar la esterilidad masculina.

EN SÍNTESIS

Las nuevas técnicas de edición genética podrían servir en breve para tratar la esterilidad masculina, pero modificarían la información genética de los espermatozoides. Esos cambios se transmitirían a las generaciones siguientes, por lo que serían adquiridos de forma permanente por el genoma humano.

Los científicos que pretenden aplacar el temor de que ese paso suponga cruzar una línea roja ética aducen que la técnica aún no es factible, pero otros opinan que no se tardará en cruzar esa línea.

La demanda de tratamientos contra la esterilidad ha impulsado desde hace décadas la adopción de nuevas técnicas biotecnológicas, para bien o para mal.

Parece bastante sencillo, y, según Orwig, intentarlo resultaría relativamente simple, no en vano lleva más de veinte años trasplantando en ratones ese tipo de células precursoras. Las consecuencias podrían ser trascendentales. El tipo de experimento que Orwig ambiciona situaría a la sociedad ante la mayor línea roja de la biología contemporánea, porque conllevaría alterar la información genética de la especie humana de tal modo que el cambio se transmitiría a las generaciones futuras.

Si se demuestra que es segura, eficaz y éticamente aceptable, la modificación de la línea germinal otorgaría un poder sin precedentes a los científicos: el de corregir la predisposición a la enfermedad grabada en nuestro ADN, por ejemplo, pero también la posibilidad de manipular la herencia y de «mejorar» la especie, pretensión que trae a la memoria el sombrío movimiento eugenésico surgido a inicios del siglo xx y que alcanzó su apogeo con el régimen nazi en Alemania.

Orwig, cuyo semblante transmite genialidad y determinación, no pretende en absoluto traspasar ningún límite ético. Pero tiene algo de provocador. Con la demostración de que es posible curar la infertilidad del ratón con un pequeño remiendo genético, espera llamar la atención del público para advertir de que la edición de los genes humanos, lejos de ser un desafío teórico asumible en un futuro remoto, es ya una posibilidad cercana que tendría consecuencias para la práctica médica. Por eso Orwig comentó hace poco a un colaborador suyo: «Vamos a hacerlo y a irritar a algunas personas. Demostrémosles que es posible, para que nadie pueda decir que no lo es. Y que la gente se pronuncie sobre ello».

La cuestión de la modificación de la línea germinal ha adquirido una gran urgencia en los dos últimos años a raíz de la difusión de una potente herramienta de edición genética llamada CRISPR/Cas9, que permite alterar el ADN de cualquier ser vivo (incluido el ser humano) con una precisión y fiabilidad nunca vistas. En abril de 2015, científicos chinos comunicaron la primera tentativa de editar genes en embriones humanos. Los titulares de *Nature* y *Science*, «La edición de embriones enciende un debate épico» y «La eugenesia acecha a la sombra de CRISPR» delataban el malestar generalizado. En el alarmista lenguaje taquigráfico de los relatos de la prensa, la posibilidad de editar los genes despertó los temores a que se diera luz verde a los «bebés a la carta» y al «mejoramiento genético».

El humilde espermatozoide, por su parte, suscita menos controversia. Y mientras que la edición genética de un embrión sigue planteando un reto técnico nada desdeñable, muchos expertos creen que desplazar la modificación de la línea germinal a las células sexuales, antes de que se fusionen para formar el cigoto, resulta más rápido y posiblemente más seguro. Pero cuando uno altera esas células, está modificando también el genoma humano, puesto que los cambios quedan grabados permanentemente en la información genética del embrión engendrado. Orwig es uno de los escasos biólogos que posee la experiencia necesaria para editar y trasplantar las espermatogonias, las células madre que dan origen a los espermatozoides.

El campo de la medicina reproductiva cuenta con un conocido historial de aplicación de innovaciones técnicas a la práctica clínica. La esterilidad masculina es también un gran negocio. Hoy en día no existe tratamiento para el varón que no puede fabricar espermatozoides, por lo que si Orwig demostrase la posibilidad de remediar ese problema en los animales con una sencilla corrección genética, sería tentador para las decenas de miles de hombres que son estériles por esa causa. También lo sería para las clínicas de fecundación in vitro (FIV), que solo en EE.UU. facturaron el año pasado unos 2000 millones de dólares, y tal vez unas diez veces más en todo el mundo.

Antes de administrar ningún tratamiento, será preciso demostrar su eficacia y su inocuidad. Los científicos exigirán tal prueba antes siquiera de barajar la creación de un ser humano con genes editados. Las versiones animales de esos experimentos ya se hallan en marcha, y la línea roja podría traspasarse pronto. Podría suceder en China, donde ya se han dado las primeras tentativas para editar embriones humanos —inviables, en este caso—. Podría ocurrir en el Reino

Unido, donde el Gobierno ha dado el visto bueno a un estudio clínico sobre una forma de modificación de la línea germinal llamada terapia de reemplazo mitocondrial y, el pasado febrero, aprobó experimentos de edición genética en embriones humanos. O podría suceder en una clínica de FIV de cualquier ciudad del mundo, siguiendo las recetas elaboradas por laboratorios como el de Orwig.

MANTENER LA CALMA Y AVANZAR

El actual debate acerca de la modificación de la línea germinal puede resultar familiar, pero pisa terreno nuevo. Los biólogos comenzaron a reescribir el lenguaje de la herencia a inicios de los años setenta, cuando descubrieron que podían cortar y pegar toscamente segmentos del ADN por medio de enzimas bacterianas, con un conjunto de técnicas bautizadas como de ADN recombinante. Este avance generó revuelo porque se temía la fuga del laboratorio de microbios genéticamente modificados y peligrosos. Tal inquietud propició en 1974 una moratoria voluntaria y sin precedentes en torno al ADN recombinante y, al año siguiente, una reunión histórica de científicos en la conferencia de Asilomar, en California. Eminentes biólogos moleculares como David Baltimore, entonces en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, debatieron sobre la seguridad de las nuevas técnicas, y ello llevó a la normativa actual que rige la investigación en EE.UU. Se supo ver que Asilomar constituía un momento histórico: Michael Rogers publicó en *Rolling Stone* la prolija crónica de «El congreso de la caja de Pandora», y en el momento en que las directrices entraron en vigor, la biotecnología emergió como una de las industrias transformadoras del siglo XX.

La sociedad aplaudió la decisión tomada por la comunidad científica en 1974 de poner freno a los precipitados avances, pero muchos investigadores creyeron que se trataba de una reacción desmesurada ante unos problemas de seguridad que no dejaban de ser hipotéticos. James D. Watson, codescubridor de la estructura de la hélice doble del ADN, la calificó como «histeria absurda».

Desde la conferencia de Asilomar, los temas polémicos de biología suelen llegar a la palestra pública con estruendo. Cuando la Academia Nacional de Ciencias de EE.UU. debatió sobre el ADN recombinante en 1977 [*véase* «Debate sobre el ADN recombinante», por Clifford Grobstein; Investigación y Ciencia, septiembre de 1977], los que se oponían a la ingeniería genética desplegaron una pancarta con una frase de Adolf Hitler: «Crearemos la raza perfecta». Un encuentro sobre la clonación humana celebrado en 2001 acabó convertido en un circo mediático. Médicos disidentes especialistas en FIV afirmaron que clonarían bebés humanos. Los equipos de televisión siguieron a los clonadores en potencia por todas partes —hasta el mismísimo aseo—. La revista *Wired* proclamaba en 2001 en su portada que en los siguientes 12 meses se clonaría el primer ser humano.

En esta ocasión, se nota cierto malestar entre los científicos, pero estos también temen que otra moratoria autoimpuesta frene el avance. ¿El resultado? Otra reunión. En diciembre del año pasado, la Academia Nacional de Ciencias y la Academia Nacional de Medicina de EE.UU. organizaron una cumbre internacional en Washington D.C., con la Real Sociedad de Londres y la Academia China de Ciencias como asistentes [*véase* «La cumbre sobre edición genética en humanos concluye con opiniones divergentes», por Sara Reardon; Investigación y Ciencia, febrero de 2016]. Baltimore reconoció que la modificación de la herencia humana seguía considerándose «impensable» a causa de la complejidad y la ineficiencia de la primera generación de herramientas de ingeniería genética. «Con los años, lo impensable puede convertirse en concebible, y hoy presentimos que pronto lograremos modificar la herencia humana.» Según él, la pregunta fundamental es: «¿Cómo queremos utilizar esa capacidad como sociedad?».

La respuesta, para cualquiera de los que asistíamos al encuentro de tres días, parecía ser: «No estamos seguros, pero tenemos tiempo de sobra para pensar en ello». Numerosas ponencias, incluido un discurso plenario a cargo del estudioso del genoma Eric Lander, del Instituto Broad, destacaron los obstáculos técnicos y la ausencia de necesidades médicas convincentes para la modificación de la línea germinal humana en un futuro cercano. «Convendría mostrarse muy prudente antes de introducir modificaciones permanentes en nuestro acervo génico», advirtió Lander.

Los organizadores eludieron hábilmente hablar de una moratoria como la de Asilomar. Baltimore leyó





EDICIÓN GENÉTICA: Se ha intentado modificar los genes de embriones humanos (*arriba*), pero los espermatozoides podrían constituir un objetivo más asequible (*derecha*).

NEIL HARDING, GETTY IMAGES (*embrión*); GETTY IMAGES (*espermatozoide*)

una cuidada declaración de los organizadores de la reunión en la que reconocían que en estos momentos sería «irresponsable» continuar con la edición de la línea germinal humana en los centros clínicos. En la clausura de la cumbre, pasó a explicar que los organizadores habían evitado deliberadamente el calificativo de *prohibición* o *moratoria*. «No queríamos emplear ninguna de esas palabras. Y no usamos ninguna», apuntó. La investigación básica puede y debe proseguir sin trabas, pero el público puede estar tranquilo acerca de los avances inminentes: las aplicaciones de la edición genética en humanos resultan inverosímiles, innecesarias, insensatas y, sin duda, no se hallan a la vuelta de la esquina.

No todo el mundo en la comunidad científica opina lo mismo. Los anfitriones de la reunión de Washington enfocaron la cuestión en términos hipotéticos. Pero si uno se pasea por los corros de conversación de los biólogos y pregunta cuáles son sus expectativas acerca de la edición de la línea germinal, se escucha otra palabra bien distinta: «inevitable».

LA CRONOLOGÍA

Algunos científicos consideraron la reunión de las Academias Nacionales como un intento de reforzar el *statu quo*. De acuerdo con el biólogo George Church, de la Escuela de Medicina de Harvard, «el propósito era tranquilizar a la opinión pública. Y, digamos lo que digamos, el objetivo seguirá siendo el mismo. No deseo alborotar a la población, pero tampoco confundirla». Esta debe comenzar a pensar ya en la edición del genoma humano, asegura Church, pues la ciencia ya casi está pisando la línea roja.

A pesar de la maraña de normativas internacionales que regula la investigación con embriones humanos, Church y otros creen que la creación de células sexuales con genes editados en una probeta (el término técnico es gametogénesis in vitro) ha logrado grandes avances en los últimos años sin atraer la misma atención del público ni provocar el mismo malestar por razones éticas que la edición genética de embriones.

¿QUEDARÁ OBSOLETO EL SEXO?

«No, pero es probable que se practique mucho menos para procrear. En el plazo de 20 a 40 años podremos obtener óvulos y espermatozoides a partir de células madre, probablemente de células cutáneas de los progenitores. Gracias a ello, realizaremos con facilidad el diagnóstico genético preimplantacional de un gran número de embriones, o practicaremos una sencilla modificación del genoma para aquellos que deseen embriones editados en lugar de seleccionar algunos».

HENRY GREELY
Director del Centro de Derecho y Biociencias de la Universidad Stanford



«Desde el punto de vista técnico, todo está listo», asegura I. Glenn Cohen, especialista en bioética de la Escuela de Derecho de Harvard. «La gametogénesis in vitro se halla mucho más cerca del objetivo que ningún otro método.» Ina Dobrinski, experta en biología de la reproducción de la Universidad de Calgary que trabaja en la edición genética de grandes animales, como el cerdo, añade: «Sobre el papel, podemos hacerlo. En la práctica nadie da un paso, por motivos éticos».

Si la edición de la línea germinal humana resulta inevitable, pese a los problemas éticos (y la prohibición legal en muchos países), ¿cómo se producirá? La especulación entre los biólogos se ha convertido en una especie de juego de salón, pero me dirigí a Church, un futurista declarado, para que propusiera un escenario plausible. Aceptó gustoso.

Opina que se acabará dando el paso decisivo de intervenir en la línea germinal, ya que el espermatozoide no parece plantear el mismo conflicto ético que el embrión o incluso que el propio óvulo. Church también opina que la terapia génica, no CRISPR *per se*, será el preámbulo de este cambio trascendental porque ya ha sido aceptada: la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. (FDA) ha autorizado docenas de ensayos de terapia génica con células somáticas (no germinales). «La terapia génica ya se está aplicando a niños pequeños y cada vez se administrará a una edad más temprana», vaticina.

Hallamos un ejemplo en un caso mediático aparecido el pasado otoño, en el que investigadores británicos combinaron la terapia génica con técnicas de edición genética para modificar las células inmunitarias de un lactante que luchaba contra la leucemia. Y el salto a la terapia génica de la línea germinal, cree Church, no tendrá lugar en los embriones humanos, sino en las más humildes, abundantes y reemplazables células del cuerpo humano: los espermatozoides. Su edición genética ahorrará a las parejas el mal trago de destruir aquellos embriones concebidos por FIV que en el cribado preimplantacional demuestren ser portadores de variantes responsables de trastornos monogénicos graves, opina. «Tal vez la mitad de los estadounidenses no vea bien que se destruyan embriones, pero creo que no tendrían inconveniente si se tratase de espermatozoides modificados genéticamente, pues no supone la muerte de ningún embrión.»

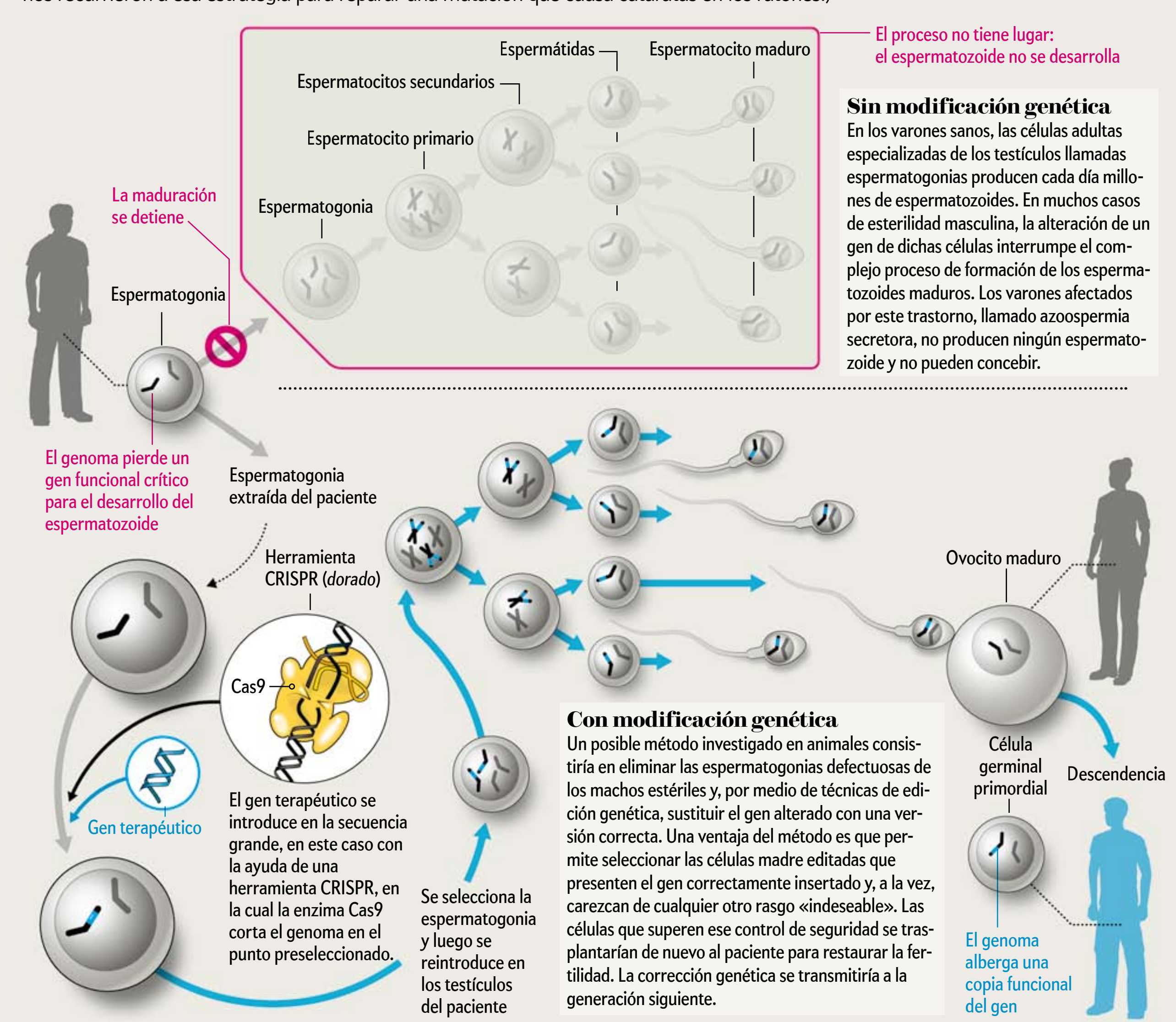
El experto añade que hay dos tipos de anomalías obvias que se podrían tratar: los trastornos monogénicos (como la enfermedad de Tay-Sachs) y la esterilidad. «Se podría incluso intervenir en las espermatogonias», afirma, refiriéndose a las células madre adultas de los testículos humanos que cada día generan espermatozoides, millones y millones de ellos. «A la gente no le importan las espermatogonias. La mayoría ni siquiera ha oído nunca esa palabra», prosigue Church. «Así que dejarán que se hagan todo tipo de pruebas para demostrar que son perfectamente funcionales; cuando se compruebe que los espermatozoides no pueden nadar, se tomarán sus células precursoras para fabricar con ellas espermatozoides que sí naden. Y eso podrá llevarse a cabo en el laboratorio sin tocar un solo óvulo. Y después, en la clínica de fertilidad, el futuro padre

KYLE HILTON (*retrato*)

EDICIÓN GENÉTICA DE CÉLULAS MADRE

Así se modifica la línea germinal

Investigadores chinos habrían intentado editar los genes de embriones humanos con fines científicos. También barajan la posibilidad de modificar genes de las células sexuales (el espermatozoide y el óvulo), lo que generaría cambios que heredaría la generación siguiente. Otra opción consistiría en manipular los genes de las células madre que originan los espermatozoides, un logro que podría dar lugar a tratamientos contra la esterilidad masculina (*abajo*) y contra ciertos trastornos monogénicos. (En 2015, investigadores chinos recurrieron a esa estrategia para reparar una mutación que causa cataratas en los ratones.)



querrá que se empleen para ver si funcionan. Y no me imagino quién podría impedirlo.»

En lo que respecta al momento, Church opina que pronto habrá varias soluciones clínicas para la esterilidad basadas en la terapia génica. ¿Cuándo? «En un par de años. Será muy difícil de detener», sostiene.

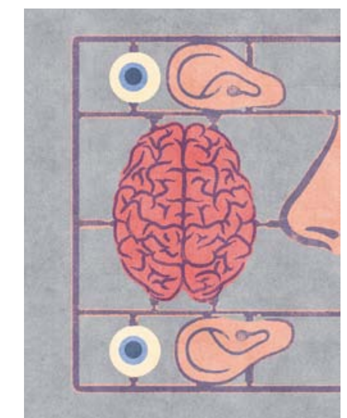
En su ponencia en la reunión de las Academias Nacionales, Orwig mostró una diapositiva en la que se leía: «La terapia génica de la línea germinal ya es técnicamente posible». Después, me explica, un miembro del comité de planificación se acercó a él entre bastidores y le dijo: «La terapia de la línea germinal será pronto una realidad, se lo aseguro». Esa opinión no quedó plasmada en el comunicado final del encuentro. Pero impulsó a Orwig a actuar, a ponerse manos a la obra para demostrar que podía realizarla. En animales, por supuesto.

UN PEQUEÑO EMPUJÓN

Unos metros más allá del despacho de Orwig, en el mismo pasillo, hay un complejo de salas que albergan cientos de ratones. Para entrar hay que vestir bata, cubrecalzados desechables y mascarilla, no por el riesgo de contraer alguna enfermedad de ellos, sino al revés. Muchas jaulas contienen ratones atímicos, desprovistos de pelo. Debido a que su sistema inmunitario es defi-

JEN CHRISTIANSEN

¿SE PODRÁ ALGÚN DÍA REEMPLAZAR TODOS LOS TEJIDOS DEL CUERPO POR OTROS FABRICADOS MEDIANTE BIOINGENIERÍA?



«En 1995, junto con Joseph Vacanti, describimos en esta revista los avances sobre el páncreas artificial, el uso de tejidos plásticos como piel artificial y la electrónica puntera que permitiría ver a las personas invidentes [*véase* «Órganos artificiales», por Robert Langer y Joseph P. Vacanti; Investigación y Ciencia, noviembre de 1995]. Todos ellos se están haciendo realidad, sea en forma de productos o en ensayos clínicos. En los siglos venideros es muy probable que logremos sustituir casi todos los tejidos del cuerpo con tales estrategias. Crear o regenerar tejidos como los del cerebro, un órgano sumamente complejo y poco conocido, exigirá una ingente labor científica. La esperanza es que la investigación en este campo avance lo bastante rápido para remediar neuropatías como el párkinson o el alzhéimer.»



ROBERT LANGER
Catedrático del Instituto David H. Koch en el Instituto de Tecnología de Massachusetts

ciente, toleran el trasplante de células de otras especies, como las espermatogonias humanas con mutaciones, lo cual permite a los investigadores entender mejor la biología de la esterilidad masculina.

Si, como Church afirma, todo debe experimentarse primero en los animales, el camino hacia la modificación de la línea germinal humana pasa por salas como esas. La técnica CRISPR aumenta la eficiencia de la tarea («¡Es tan tremendamente fácil!», exclama Orwig), aunque podemos alterar los genes de las espermatogonias desde hace más de veinte años, desde 1994, cuando el biólogo de la Universidad de Pensilvania Ralph Brinster (tutor de Orwig) llevó a cabo los primeros experimentos en ratones.

La esterilidad masculina obedece a múltiples causas, como problemas obstructivos en los conductos, defectos en el complejo proceso de creación de los espermatozoides o una cantidad insuficiente de ellos, entre otras. Pero en muchos casos, el varón simplemente no puede fabricarlos; el trastorno, llamado azoospermia secretora, afecta a 350.000 hombres solo en EE.UU., según Orwig. Varios genes están vinculados con la incapacidad de crear espermatozoides, como *tex11* y *sohlh1*, y esos casos constituyen el trasfondo del experimento que Orwig ansía realizar.

Lo que pretende es tomar ratones infecundos, portadores de una versión defectuosa de uno de esos genes, extraer las espermatogonias de sus testículos y corregir el defecto en ellas mediante las nuevas técnicas de edición genética. Una vez que las células modificadas se hayan multiplicado lo suficiente en el tubo de ensayo y se escojan las que contienen la modificación correcta, se reimplantarán en los testículos de los roedores. Y, por lo menos en los experimentos de este tipo con animales, no serán necesarias complejas pruebas moleculares; Orwig sabrá en un par de meses que la edición del gen ha culminado con éxito, sin género de dudas, si los machos estériles se convierten en progenitores.

«Llevamos 25 años trasplantando células madre en especies de todo tipo: ratones, ratas, hámsters, ovejas, cabras, cerdos, perros y monos», explica Orwig. «Es una franja bastante amplia del árbol evolutivo, y, por lo que sabemos, en todo ese tiempo no les ha sucedido nada malo a ninguno de esos animales.» Por esta razón se siente optimista y cree que demostrará que la edición de genética de las células madre remediará la infecundidad del ratón.

Podría parecer un experimento inocuo en animales, pero editar una espermatogonia comporta modificar permanentemente la línea germinal, puesto que los espermatozoides resultantes transmitirán la corrección a la nueva generación. Ese tratamiento de la esterilidad masculina traspasaría la línea roja. Y si bien Orwig no contempla dar el siguiente paso con humanos en su laboratorio de Pittsburgh, la demostración preclínica en ratones y primates supondría un acicate para el sector privado, que podría decidir intentarlo; y es donde Church cree que se desarrollarán los últimos pasos. «La investigación para editar los espermatozoides será financiada por fuentes privadas, como otros tratamientos», afirma.

Por supuesto, habrá que superar obstáculos técnicos antes de obtener el tratamiento clínico. Para empezar, habrá que descubrir el modo de mantener vivas las espermatogonias humanas el tiempo suficiente para elegir las más adecuadas para el trasplante, tarea nada sencilla hoy por hoy. Pero esas células masculinas son una diana mucho menos móvil que los embriones, cuyo dinamismo los hace cambiar con rapidez. Los investigadores chinos que han intentado editar genes de embriones con CRISPR, por ejemplo, han descrito tanto mutaciones indeseadas como mosaicismo (lo que significa que en algunas células se ha consumado la edición y en otras no). Además, antes de obtener el embrión, se puede analizar y verificar el ADN de las células madre editadas.

Eso es lo que convierte el hipotético experimento de Orwig en algo tan políticamente incómodo. A causa de las prohibiciones decretadas por el Congreso estadounidense en los años noventa, la Red de Institutos Nacionales de Salud de ese país no puede financiar ninguna investigación que implique la destrucción de embriones humanos. Una versión humana del experimento con ratones propuesto por Orwig eludiría esa prohibición, pero podría caer ante un nuevo obstáculo

LORENZO GRITTI (*ilustración*); KYLE HILTON (*retrato*)

que la Cámara de Representantes de EE.UU. aprobó dos semanas después de la cumbre de diciembre sobre la edición genética. En un par de frases inmersas en las 2009 páginas de los Presupuestos Generales del Estado de 2015, el Congreso prohíbe a la FDA aprobar ninguna intervención médica que entrañe el uso de embriones editados genéticamente; el enunciado no prohíbe explícitamente la edición de las células germinales, pero el catedrático de derecho de la Universidad Stanford Henry Greely cree que la FDA resolverá que esos espermatozoides son algo más que células humanas mínimamente manipuladas y requieren su autorización como un medicamento o producto biológico. La disposición, opina el experto, podría retrasar una década o dos todo el asunto.

Ello no significa que el experimento de Orwig con ratones infrinja la ley; solo será un pequeño empujón por la resbaladiza pendiente que nos llevará hasta la modificación de células germinales. El paso que cruzará la línea roja podrían darlo los centros privados de FIV, que cuentan con un dilatado (y polémico) historial de ir más allá con las técnicas reproductoras novedosas. «Es una técnica tan fácil de aplicar que basta con que alguien con un poco de descaro se reúna con alguien de una clínica de FIV y decidan intentarlo», me asegura George Daley, biólogo especialista en células madre de la Escuela de Medicina de Harvard. «Está a la vuelta de la esquina y la gente ha de comenzar a pensar en ello. Nos hallamos ante una técnica de reproducción que podría resultar perturbadora para muchos.»

Probablemente no sucederá en Estados Unidos si la opinión pública —y la clase política— siguen mirando con recelo la modificación de la línea germinal, pero Orwig se está preparando con calma para el día en que se vuelva más aceptable. «Trabajaremos con afán tras las bambalinas, hasta que la opinión del mundo cambie.»

TRASPASAR FRONTERAS

La «opinión del mundo» acerca de la edición de la línea germinal es enrevesada y contradictoria. A la mayor parte de la ciudadanía estadounidense no le gusta la idea de editar genes en embriones o en células germinales, según un análisis reciente de 17 encuestas de opinión publicado en el *New England Journal of Medicine*. Pero paradójicamente, la mayoría sí está a favor de la edición genética en el adulto si con ello se evita que un niño herede ciertas enfermedades. (Robert J. Blendon, autor principal del estudio, afirma que cualquier intervención en el adulto que sea positiva para la siguiente generación contaría con un notable apoyo de la ciudadanía.) Pero el estudio también señaló que gran parte de esas encuestas formulaban las preguntas con un lenguaje que podría no ser preciso, desde el punto de vista científico. En otras palabras, aunque la reunión de las Academias Nacionales concluyó el pasado diciembre con el compromiso de proseguir el debate público sobre la edición de la línea germinal, no está claro que el público entienda los conceptos de ese diálogo. Y si bien los foros públicos se esfuerzan por hallar un vocabulario comprensible, la ciencia va por delante.

Mientras charlábamos en su despacho la primavera pasada, Orwig asentía con la cabeza al ojear un documento. «Este artículo me encanta de veras», me confesó. Se estaba refiriendo a un estudio publicado el pasado febrero en la revista *Cell Stem Cell* por un grupo encabezado por Qi Zhou, de la Academia China de Ciencias. En resumen, el experimento ofrecía una receta para introducir cambios genéticos en las células germinales.

Los investigadores demostraban que podían crear espermatogonias en una placa; por medio de una técnica usada en las clínicas de FIV, dichas células pueden inyectarse en ovocitos para crear ratones machos fértiles. Daley opina sobre este avance: «Con la incorporación de CRISPR, tenemos *Un mundo feliz*».

En el mundo feliz que Aldous Huxley imaginó en 1932, el relato transcurre bajo un régimen totalitario, sin fronteras nacionales ni normativas locales. En el mundo actual, si la edición genética de la línea germinal se lleva a cabo en un lugar, acabará haciéndose en todas partes. «Cada país legisla sus normas, pero la ciencia no sabe de fronteras», recuerda Cohen. Aunque Estados Unidos propugne leyes contra la modificación germinal, habrá que levantar un muro mucho más alto que el propuesto por Donald Trump para mantener las líneas germinales de los estadounidenses alejadas del futuro flujo de ADN modificado.

«Lancemos una mirada al mundo en los próximos cien años: si alguien aplica la técnica en otro lugar, se habrá acabado la polémica», sentencia Daley. «Solo será cuestión de tiempo que esas personas conciban hijos que cruzarán las fronteras y desembarcarán en nuestras orillas. Y si la seguridad y la eficacia son las adecuadas, será inevitable que esas personas vaguen por el ancho mundo, procreen y, más tarde o más temprano, lleguen a nuestro país, y sus cambios acabarán formando parte del acervo génico de los estadounidenses.»

Cuando finalizaba mi entrevista con Orwig, este echó un vistazo al ordenador de su mesa. Un periodista le había enviado un correo electrónico para saber su opinión sobre otro experimento que amenaza cruzar la línea roja: un grupo chino acaba de describir su intento de editar embriones humanos (inviables) para que sean resistentes a la infección del VIH. «Con el tiempo aprenderemos un vocabulario que reconocerá que habremos dado el paso, aunque creo que ya lo hemos dado», concluye. IyC

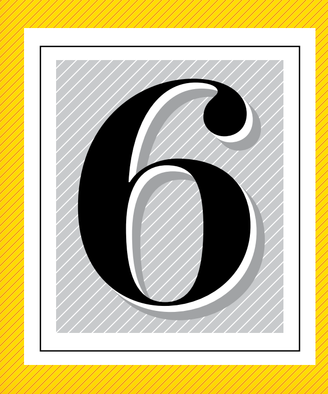
PARA SABER MÁS

The Pandora's box congress. Michael Rogers en *Rolling Stone*, 19 de junio de 1975.
CRISPR germline engineering—The community speaks. Katrine S. Bosley et al. en *Nature Biotechnology*, vol. 33, págs. 478-486, mayo de 2015.
Experimental methods to preserve male fertility and treat male factor interfility. Kathrin Gassei y Kyle E. Orwig en *Fertility and Sterility*, vol. 105, n.º 2, págs. 256-266, febrero de 2016.
Complete meiosis from embryonic stem cell-derived germ cells in vitro. Quan Zhou et al. en *Cell Stem Cell*, vol. 18, n.º 3, págs. 330-340, 3 de marzo de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

La edición genética, más precisa. Margaret Knox en *IyC*, febrero de 2015.
CRISPR llega a los cultivos. Stephen S. Hall en *IyC*, septiembre de 2016.





¿VENCEREMOS AL ENVEJECIMIENTO?

Bill Gifford

VIVIR HASTA LOS



AÑOS

ANDREW MYERS (*fotografía*); ANGELA CAMPOS, STOCKLAND MARTEL (*composición*)



Bill Gifford es autor de *Spring chicken: Stay young forever* (*Or die trying*), un libro sobre la ciencia del envejecimiento.

En marzo, representantes del Libro Guinness de los Récords viajaron hasta Haifa, Israel, para visitar a un confitero retirado de nombre Israel Kristal. El motivo: proclamarle el hombre más viejo del mundo, con 112 años y 178 días. Kristal ha tenido una vida extraordinaria.

EN SÍNTESIS

Las dietas y otras estrategias han fracasado en su intento de alargar la duración de la vida sana, tanto en el ser humano como en otros primates, a pesar de los alentadores resultados obtenidos en organismos sencillos e, incluso, en ratones.

Sin embargo, los mecanismos celulares que se ponen en marcha ante la privación de alimentos están demostrando ser objetivos prometedores para alargar la vida.

Ciertos fármacos, entre los que figuran medicamentos contra la diabetes y contra el cáncer, actúan sobre tales mecanismos. En la actualidad son objeto de estudio para valorar su potencial como sustancias antienvejecimiento.

Cuando nació, en 1903, la esperanza de vida de un niño en Polonia apenas rondaba los 45 años. De su infancia recuerda haber lanzado caramelos al emperador austrohúngaro Francisco José I. Como adulto, dirigió una fábrica de caramelos en las proximidades de Lodz. Ha vivido dos guerras mundiales y sobrevivió a casi doce meses de cautiverio en campos de concentración, tres de ellos en Auschwitz. Su mujer y sus dos hijos murieron ejecutados. Tras contraer nupcias de nuevo, emigró a Israel, donde se dedicó a la fabricación artesanal de golosinas. En la actualidad, tiene una veintena de bisnietos. Nacido en la época del alumbrado a gas, este centenario vive ahora en los tiempos de Twitter.

«La hazaña del Sr. Kristal es extraordinaria», comentó Marco Frigatti, director de los récords del Libro Guinness, en un comunicado oficial. En el mundo desarrollado, la esperanza de vida media de un varón raya los 80 años. Solo dos de cada 10.000 personas llegan a centenarias, en su gran mayoría mujeres. A sus 112 años y pico, Kristal se acerca al límite de la longevidad observada en varones. Nadie ha conseguido aún superar a la francesa Jeanne Calment, que en 1997 murió a la edad de 122 años.

¿Qué pasaría si, en vez de traspasar a los 80 u 85 años, una persona viviese 100, o incluso 112 años, como en el caso de Kristal? Las falsas promesas de una vida más larga o, en algunos casos, de la inmortalidad se remontan, por supuesto, a la época de los alquimistas. Hasta la fecha, no existen muchos datos que apoyen semejante optimismo. Pero algunos científicos creen que las personas centenarias como Kristal realmente envejecen más despacio que las demás. Descubrimientos dignos de confianza de las investigaciones biológicas que se llevan a cabo en la actualidad indican que los períodos de gran privación —como los que a buen seguro sufrió el fabricante de caramelos— influyen en la longevidad de las células. Esas investigaciones están desvelando modos de extender esos límites, no mediante dietas sino con medicamentos.

Se da la circunstancia de que media docena de medicamentos o suplementos, todos aprobados para el uso en humanos con otros fines, actúan sobre mecanismos celulares que parecen mejorar la reparación de los daños internos y, así, ayudan a prolongar la vida. En el caso de algunas de esas sustancias, entre las que figura un fármaco antitumoral, ya se ha comprobado que prolongan la longevidad media y máxima de la vida, tanto en ratones como en otros animales de experimentación. Este año, un conocido antidiabético llamado metformina será el protagonista del primer ensayo clínico concebido para desvelar si un medicamento puede retrasar el envejecimiento humano.

Fruto de toda esta actividad, un pequeño pero reputado colectivo de expertos comienza a augurar que, antes de que los lectores de esta revista fallezcan, podría ser realidad un notable aumento de la longevidad. «Son tantas las sandeces que se han llegado a decir sobre la vida eterna y la forma de burlar a la muerte que lo que hoy sabemos que es posible pasa desapercibido», afirma Matt Kaeberlein, eminente biogerontólogo de la Universidad de Washington. «Al ritmo que avanzan las investigaciones, creo que en los próximos 40 o 50 años será plausible un aumento de entre el 25 y el 50 por ciento de la longevidad sana.»

«Ha habido una respuesta enorme y el interés desatado es tremendo; se tiene la impresión de que algo grande va a suceder», afirma Nir Barzilai, uno de los directores del ensayo clínico con metformina y director de la investigación sobre el envejecimiento de la Escuela de Medicina Albert Einstein. «Creo que obtendremos resultados significativos y que los próximos medicamentos serán mejores.»

MÁS ALLÁ DE LAS DIETAS

La raíz del envejecimiento radica, al menos en parte, en nuestro apetito. Desde los años treinta del siglo xx, se sabe que la alimentación deficitaria puede alargar la vida de los animales de laboratorio, como el ratón y la rata; en algunos experimentos, hasta un 40 por ciento más. Incluso personas que no son científicos, como Kristal, creen que los episodios de hambre vividos durante y después de la Segunda Guerra Mundial pueden haber contribuido a su longevidad. En una entrevista para el diario *Haaretz*, comentó: «Como para vivir y

Un interruptor del envejecimiento

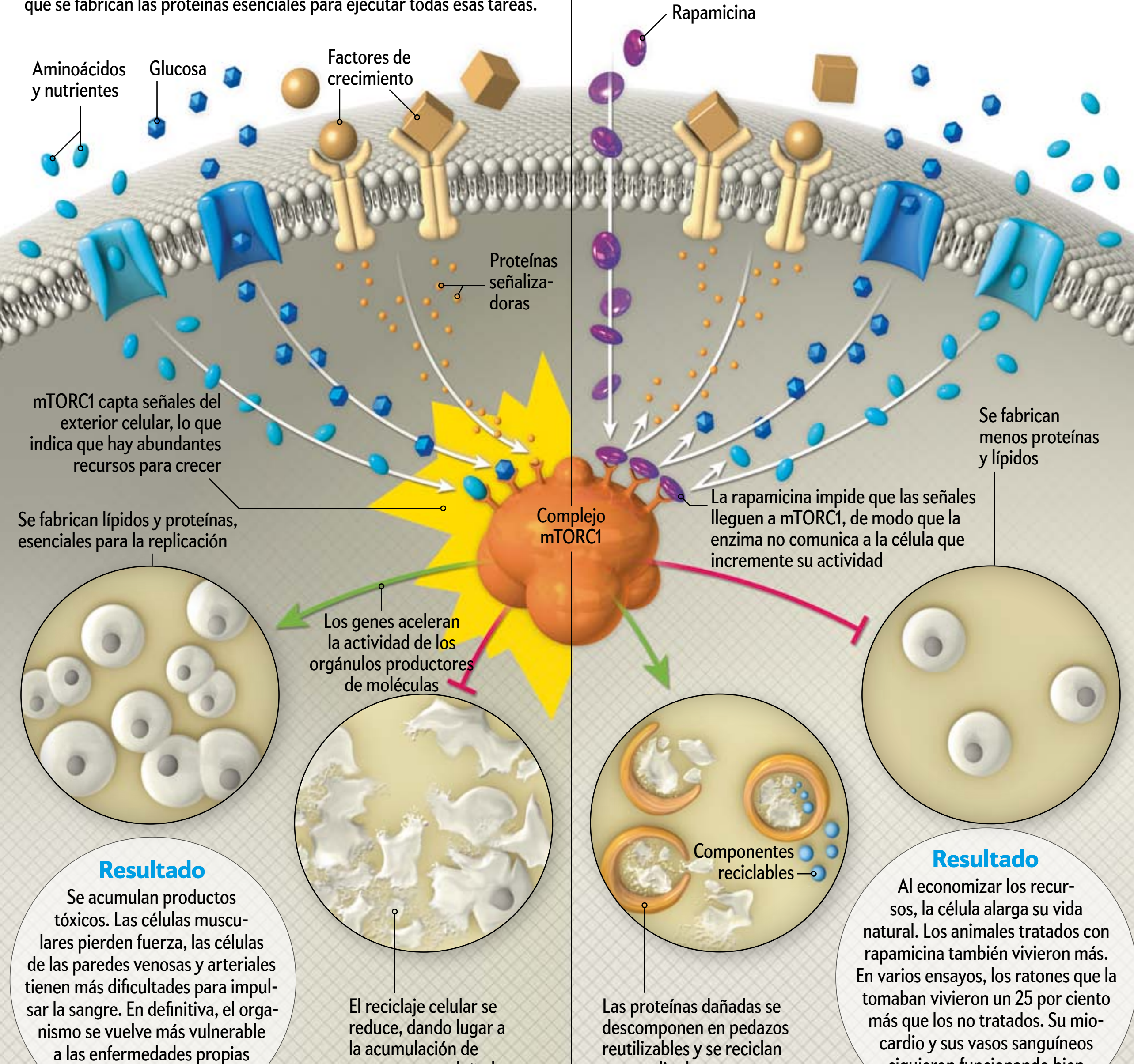
En el suelo de la isla de Pascua, en los años setenta del pasado siglo, se descubrió una sustancia que detenía el crecimiento celular en los hongos. Se la llamó rapamicina, en alusión a Rapa Nui, el nombre nativo de la isla. Con el tiempo, se descubrió que ese compuesto interfería con una enzima celular que resulta esencial para el crecimiento y la replicación. Puesto que dichas actividades acaban deteriorando las funciones celulares, el bloqueo de la enzima alargaba la plenitud de la vida de la célula. La enzima, bautizada como mTOR (de *mechanistic target of rapamycin*), parece ser un interruptor que pone en marcha o detiene el envejecimiento en las células y prolonga la vida de los animales.

Cuando mTOR está activada

La enzima está formada por dos complejos, de los que el denominado mTORC1 actúa como un sensor del entorno de la célula. Cuando los nutrientes abundan y resulta sencillo obtener energía para crecer, mTORC1 pone la maquinaria celular a máximas revoluciones. Este complejo favorece la entrada de glucosa en la célula para generar energía, ayuda a los factores de crecimiento que ponen en marcha la replicación y favorece la entrada de los aminoácidos que son la materia prima con la que se fabrican las proteínas esenciales para ejecutar todas esas tareas.

Cuando mTOR está desactivada

La rapamicina enmascara a mTORC1 impidiendo que detecte la glucosa, las señales de crecimiento o los nutrientes, aunque la célula se halle inmersa en ellos. En consecuencia, esta se comporta como si sufriera un período de escasez y modera su metabolismo para conservar los recursos. Las funciones celulares básicas se ralentizan, especialmente el crecimiento y la replicación.



EMILY COOPER

¿HABRÁ ALGÚN DÍA UNA ASISTENCIA SANITARIA ADECUADA PARA TODOS?



«En los últimos 25 años, la comunidad mundial ha hecho enormes progresos en su objetivo de conseguir una asistencia sanitaria equitativa, pero tales avances no han llegado hasta las comunidades más remotas del mundo. En lo más profundo de la selva tropical, donde la red de transporte es inexistente y los teléfonos móviles carecen de cobertura, la mortalidad alcanza su máximo, el acceso a la asistencia sanitaria es muy limitado y la calidad de la misma deja mucho que desear. La Organización Mundial de la Salud calcula que mil millones de personas no ven en toda su vida a un solo médico o enfermero a causa de la distancia. La contratación directa del personal sanitario por parte de las propias comunidades podría paliar esta situación. Hasta podría ayudar a combatir las epidemias como la del ébola y mantener el acceso a los cuidados básicos cuando los centros sanitarios se vean forzados a cerrar sus puertas. Hoy en día, mi organización, *Last Mile Health*, con la colaboración del Gobierno de Liberia, cuenta con más de 300 trabajadores sanitarios en otras tantas comunidades de nueve distritos. Pero no podemos hacer solos este trabajo. Si la comunidad mundial pretende en serio garantizar el acceso universal a la asistencia sanitaria, debe invertir en trabajadores sanitarios que lleguen hasta las comunidades más remotas.»



RAJ PANJABI *es cofundador y director ejecutivo de la ONG* Last Mile Health *y profesor de la Escuela de Medicina de Harvard*

no vivo para comer. No necesitamos mucho. Todo lo que se come de más no es bueno».

Por desgracia —o por suerte, según se mire— los experimentos de restricción calórica extrema en monos, los animales más afines a nosotros, han generado resultados contradictorios. La baja ingesta de calorías parecía funcionar bien en uno de los estudios pero después, otro ensayo clínico solvente demostró que simplemente comiendo de forma más natural, a base de alimentos integrales y con bajo contenido en azúcares, parecía funcionar igual de bien, independientemente de las calorías ingeridas. En cualquier caso, son muy pocas las personas que soportarían un régimen alimenticio que requiere un recorte calórico de un 25 por ciento.

Los experimentos con organismos inferiores han desvelado rutas celulares específicas (cadenas de interacciones moleculares) con efectos beneficiosos, que se ponen en marcha cuando hay escasez de nutrientes. Esas rutas surgieron durante la evolución para posibilitar la supervivencia a largos períodos sin probar bocado. En teoría, su activación por medio de fármacos podría generar los mismos beneficios sin la sensación de morir de hambre. Un ejemplo es la ruta de la enzima AMPK, que actúa como una especie de indicador de combustible celular. Cuando los nutrientes escasean, como ocurre durante el ejercicio intenso o con la restricción calórica, la AMPK empieza a bombear glucosa hacia el interior de las células para generar energía y aumenta la sensibilidad de estas hacia las hormonas que favorecen ese transporte, como la insulina. También facilita la descomposición de las grasas para obtener más energía. Durante el ejercicio, la AMPK estimula la creación de nuevas mitocondrias, los generadores de energía de la célula. Todos esos efectos mejoran la salud.

Existen pruebas convincentes de que el envejecimiento y la velocidad del metabolismo están directamente relacionados. En 1993, Cynthia Kenyon, de la Universidad de California en San Francisco, descubrió que las mutaciones en un solo gen, el *DAF-2*, podían duplicar la longevidad del gusano *Caenorhabditis elegans*. Ese gen está vinculado con la velocidad del metabolismo. Con todo, aún no sabemos gran cosa sobre la genética del envejecimiento, de modo que, por ahora, el interés de los investigadores se centra sobre todo en los niveles superiores de la mecánica celular.

Uno de los mecanismos antienvejecimiento más prometedores vino dado por el azar. En 2001, Valter Longo, biólogo de la Universidad del Sur de California, se marchó de fin de semana y olvidó alimentar las células de levadura de un experimento. Su sorpresa fue comprobar que ese ayuno absoluto hizo que viviesen más de lo habitual. La razón, descubrió,

LORENZO GRITTI (*ilustración*), KYLE HILTON (*retrato*)

SI TE INTERESA
ESTE TEMA...



Descubre *La ciencia de la longevidad*, nuestro monográfico de la colección TEMAS de *Investigación y Ciencia* que ahonda en las causas y las consecuencias del envejecimiento y ofrece una perspectiva general de las estrategias en estudio para retardarlo.

www.investigacionyciencia.es/revistas/temas/numero/69

radica en una cascada de reacciones moleculares a la que se suele nombrar por la enzima que ocupa el centro: mTOR.

Esa ruta fue descubierta unos años antes gracias a la rapamicina, un medicamento hallado en las bacterias del suelo. El fármaco en cuestión actúa sobre una de las principales vías que regulan el crecimiento y la división de la célula, como si fuese el disyuntor de una fábrica en miniatura. Los investigadores la bautizaron con el nombre de mTOR porque es un «objetivo mecanicista de la rapamicina» (en inglés, *mechanistic target of rapamycin*). Cuando mTOR se activa, la «fábrica» celular opera con normalidad, sintetizando nuevas proteínas, creciendo y, en última instancia, dividiéndose. Pero cuando se reprime, como ocurre por efecto de la rapamicina (o por un ayuno breve) el crecimiento y la multiplicación celular se ralentizan o se detienen. Ese es el motivo por el que la rapamicina es un eficaz inmunodepresor que protege los órganos transplantados y, desde fecha más reciente, también un tratamiento contra el cáncer; ambas enfermedades implican una división celular desenfrenada.

El trabajo de Longo condujo al descubrimiento de la función crucial de mTOR en el envejecimiento. Cuando los nutrientes escasean, la enzima se detiene y la fábrica celular comienza a operar con mayor eficiencia, reciclando las proteínas viejas para fabricar otras nuevas e incrementando la actividad de los mecanismos de depuración y reparación celular, a la espera de que lleguen tiempos mejores. La división celular se ralentiza. El animal queda así en mejores condiciones para sobrevivir hasta la próxima comida.

«Lo que en realidad hace mTOR es supervisar el entorno y, si el alimento abunda, se pone en marcha; en los organismos sencillos, hace que crezcan con rapidez y se multipliquen», nos explica Kaeberlein. «Eso tiene mucho sentido, porque las épocas de bonanza son el mejor momento para concebir hijos.» No sorprende, pues, que el mecanismo de mTOR sea un hito evolutivo primordial, al cual seres vivos situados en el tronco y en las ramas altas del árbol de la vida, desde las levaduras unicelulares hasta el hombre y las ballenas, han recurrido una y otra vez.

El cambio de actividad afecta la supervivencia. En 2009, un grupo de investigación publicó en la revista *Nature* que la rapamicina alargaba la vida de los ratones de laboratorio. Fue un descubrimiento impresionante: ningún otro fármaco había aumentado tanto la longevidad de un mamífero en un experimento controlado. Y no se trataba de un único grupo de ratones, sino de tres grupos genéticamente heterogéneos. Todos ellos vivieron más tiempo y no solo en promedio: la longevidad máxima de los roedores aumentó, lo que algunos consideran una prueba clara de que la rapamicina ralentizó el proceso mismo de envejecimiento.

Los ratones que la recibieron por regla general gozaron de mejor salud y más vigor durante más tiempo que los que no fueron tratados con ella. Sus tendones, por ejemplo, permanecieron más flexibles y elásticos. Lo mismo ocurrió con su corazón y sus vasos sanguíneos. Hasta su hígado estaba en mejor estado que el de los ratones de control. Mostraban mayor actividad, incluso a medida que se iban haciendo mayores. Y no solo eso, la rapamicina alargó la esperanza de vida media y la longevidad máxima aún cuando los ratones empezaron a tomarla a la edad de 20 meses. Era lo mismo que administrar a una mujer de 70 años una píldora que le permitiese vivir más allá de los 95. O, dicho de otro modo, imaginemos un fármaco que permitiese a Kristal vivir hasta los 130.

Otros laboratorios reprodujeron esos resultados y los mejoraron. La administración de la rapamicina a ratones adultos acabó haciendo que vivieran un 25 por ciento más, casi lo mismo que si hubiesen sido sometidos a la restricción calórica. Por supuesto, los ratones no son personas, pero con la rapamicina surgió la posibilidad de que, por lo menos, hubiese algo que pudiese frenar el envejecimiento y retrasar la aparición de las enfermedades ligadas a la edad. «La rapamicina constituye el primer éxito rotundo, el primer fármaco del que todo el mundo afirma que podría ser la solución real», declara Brian Kennedy, director ejecutivo del Instituto Buck para la Investigación del Envejecimiento en Novato, California.

Con todo, la rapamicina no está exenta de inconvenientes. Puede acarrear efectos secundarios desagradables, en concreto, aftas bucales y mayor incidencia de infecciones, pues deprime la respuesta inmunitaria. En los estudios con ratones, los machos parecieron experimentar atrofia testicular. Tales efectos serían tolerables en pacientes con cáncer o trasplantados, cuya salud es bastante precaria, pero la descartarían como fármaco antienvejecimiento en las personas sanas. El remedio podría ser peor que la enfermedad. Pero ¿qué pasaría si se administrase a esas personas sanas de otra forma o en dosis más reducidas? ¿Podría también, de algún modo, alargarles la vida?

Con el propósito de dar respuesta a esas preguntas, Kaeberlein y su colega Daniel Promislow han iniciado un ensayo clínico atípico con dosis reducidas de rapamicina en perros de compañía de mediana edad. Dan por sentado que el mejor amigo del hombre es un sustituto razonable: «Comparten nuestro entorno y contraen las mismas enfermedades que nosotros a medida que envejecen», afirma Kaeberlein. Según sus resultados preliminares, obtenidos a partir de ecocardiogramas, los canes tratados con rapamicina ya

¿PODRÁ LA CIENCIA DEL CEREBRO CAMBIAR EL DERECHO PENAL?

«Con toda probabilidad, el cerebro es una máquina causal, en el sentido de que pasa de un estado a otro en función de las circunstancias precedentes. Las implicaciones que esto tiene para el derecho penal son absolutamente nulas. Para empezar, las aves y los mamíferos poseen circuitos de autocontrol, que el aprendizaje por refuerzo modifica (obteniendo recompensas cuando se toma la decisión correcta), especialmente en un contexto social. El derecho penal también tiene que ver con la seguridad pública y el bienestar. Aun si pudiésemos descubrir un circuito exclusivo para los violadores en serie de niños, por ejemplo, no se les podría dejar en libertad porque tenderían a reincidir en su conducta. Si por ejemplo, en el caso de John Geoghan, párroco de Boston sentenciado por abusar sexualmente de unos 130 niños, se llegase a la conclusión de que «como no es culpa suya tener ese cerebro, hay que dejar que se marche a casa» el resultado sería, indudablemente, que alguien se tomaría la justicia por su mano. Y cuando la injusticia usurpa el lugar de un código penal cuya solidez descansa en los años que lleva dictando leyes justas e imparciales, las cosas adoptan un mal cariz con suma rapidez.»



PATRICIA CHURCHLAND *es catedrática de filosofía y neurociencias en la Universidad de California en San Diego*

mostraban un rejuvenecimiento de la función cardíaca al cabo de pocas semanas. «Se aprecia con claridad que el corazón se contrae mejor en los tratados con rapamicina», comenta Kaeberlein. «En los animales viejos, el riego sanguíneo deficiente es, casi con seguridad, un factor decisivo en el deterioro de los tejidos del organismo.»

Kaeberlein afirma que un indicio alentador del potencial de la rapamicina como agente antienvejecimiento es que, en dosis pequeñas, podría actuar más como un modulador de la respuesta inmunitaria que como un inmunodepresor. De hecho, en esas dosis reducidas parece intensificar ciertos tipos de función inmunitaria. Un pequeño ensayo clínico llevado a cabo con humanos por la empresa Novartis, que comercializa una versión de la rapamicina llamada Afinitor como tratamiento contra el cáncer, demostró que los ancianos que la tomaban respondían mejor a una vacuna antigripal. Esto indicaría que, en ciertos casos, podría estimular la respuesta inmunitaria. Otro dato interesante: un estudio holandés descubrió que los nonagenarios sanos presentaban una menor actividad de mTOR.

Si se obtiene la financiación, el siguiente paso consistirá en un estudio longitudinal a largo plazo en perros más viejos y tratados con rapamicina, en que se analizará su evolución a medida que envejezcan. Si los resultados coinciden con los obtenidos en ratones (si los canes viven más tiempo y más sanos) quedaría justificado un ensayo clínico en humanos. «En el plazo de cinco años, podríamos saber hasta qué punto funciona de veras», comenta Kaeberlein.

ALARGAR LA VIDA

La clave consiste en aunar «más sano» con «más longevo». Nuestra vida ha ido extendiéndose, pero en la última parte somos más vulnerables a la enfermedad y a la incapacidad. Tal y como demostraron los demógrafos James W. Vaupel y Jim Oeppen en un artículo publicado en *Science* en 2002, la esperanza de vida de las poblaciones más longevas ha estado aumentando de manera más o menos lineal desde los años cuarenta del siglo XIX (las japonesas encabezan en este momento la lista). Nunca antes en la historia habíamos vivido tanto.

Pero, al mismo tiempo, la duración de la salud (definida como la duración de la vida saludable) no ha crecido al mismo ritmo. Esto significa que, en realidad, el período de enfermedad y de incapacidad propio del ocaso de la vida, la temida decrepitud de la vejez, ha ido alargándose. Conforme vivimos más y más, lo único que cambia es que caemos víctimas de enfermedades distintas. A medida que la mortalidad por cardiopatías y por cáncer desciende, aumenta el número de personas vulnerables a la enfermedad de Alzheimer. Uno de cada nueve estadounidenses mayores de 65 años está afectado por ella o por otras formas de deterioro cognitivo, y el riesgo de padecerlo aumenta espectacularmente a partir de los 80.

«El auge del alzhéimer ha sido extraordinario, pero eso es justamente lo que cabe esperar cuando cada vez más gente alcanza la edad en que suele aparecer, entre la séptima y la octava década de vida», comenta S. Jay Olshansky, demógrafo de la Universidad de Illinois en Chicago. «Si seguimos por ese camino, creo que aún será peor. La alternativa estriba en frenar el envejecimiento y retrasar la morbilidad todo lo posible.»

Olshansky no conoce a Kristal, pero el actual poseedor del récord Guinness parece ser el tipo de persona en la que está pensando. A sus 112 años, Kristal todavía conserva una mente lúcida y es un conversador ocurrente. Ha conseguido resistir las enfermedades mortales del envejecimiento (no solo el cáncer y las cardiopatías, sino también el alzhéimer y la diabetes que, en conjunto, suponen cerca de la mitad de las muertes en el mundo desarrollado). Los investigadores observan que, en los centenarios como él, el período de enfermedad propio del final de la vida es, a menudo, mucho más breve que el de los septuagenarios que fallecen. Todo medicamento antienvejecimiento tendría que emular ese mismo efecto, en vez de prolongar meramente la vida a expensas de la salud y del bienestar, opina Olshansky.

Pero hasta hace muy poco, los investigadores se han enfrentado a un formidable escollo a la hora de desarrollar ese tipo de medicamento: la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de los Estados Unidos

KYLE HILTON (*retrato*)

(FDA, por sus siglas en inglés) no ha considerado que el envejecimiento sea una enfermedad. Por lo tanto, no aprobaría ningún fármaco dirigido contra el propio proceso de envejecimiento. Desde el punto de vista de la agencia, esta postura tiene sentido: no hay un método objetivo para «medir» el envejecimiento; no existe un análisis de sangre, por ejemplo, que pueda determinar si se está envejeciendo más rápido o más despacio de lo normal. Entonces, ¿cómo podríamos saber si un medicamento antienvejecimiento funciona? Esta postura oficial ahogó cualquier incentivo para que las compañías farmacéuticas invirtieran en el estudio del envejecimiento y de los fármacos destinados a ralentizarlo, pues no habría modo de aprobarlos y comercializarlos.

Sin embargo, el camino empezó a despejarse en 2015, cuando la FDA aprobó un ensayo clínico destinado a evaluar las propiedades antienvejecimiento de la metformina. Aprobada para la diabetes de tipo 2 (la más frecuente) en el Reino Unido a mediados del siglo pasado, la metformina superó la revisión de la FDA en los Estados Unidos en 1994. Desde entonces, millones de pacientes la han tomado como tratamiento de primera línea. Disponible hoy como genérico barato, es uno de los medicamentos más recetados del mundo, hasta el punto de que la Organización Mundial de la Salud lo ha declarado medicamento «esencial». Aumenta la sensibilidad de las células hacia la insulina, la hormona que les indica que deben absorber azúcar (glucosa) de la sangre.

Como tanta gente la toma, ha sido posible detectar patrones interesantes entre los pacientes. En concreto, los estudios epidemiológicos han descubierto que quienes toman la metformina parecen gozar de una menor incidencia de cáncer. Otros estudios apuntan a que también podría tener efectos beneficiosos sobre el sistema cardiovascular. Además, mientras que los diabéticos, por regla general, pierden varios años de esperanza de vida, un análisis realizado en 2014 con datos de pacientes británicos descubrió que, en efecto, los diabéticos más ancianos que la tomaban estaban viviendo un 18 por ciento más que los controles equivalentes que no padecían diabetes. También vivieron más tiempo que los diabéticos que tomaban otro tipo de antidiabéticos, las sulfonilureas, lo que indica que era la metformina, y no simplemente el control de la diabetes, lo que otorgaba mayor longevidad.

No está del todo claro cómo actúa exactamente la metformina. El mecanismo de este derivado de un viejo remedio de herbolario, a base de lila francesa o ruda de cabra, ha sido objeto de debate durante décadas. Se da por cierto que activa la ruta AMPK y sus favorables cambios metabólicos. También parece influir en la insulina por otros canales e, incluso, inhibir a mTOR de alguna forma.

La posibilidad de que la metformina pudiese incrementar la longevidad atrajo la atención, entre otros, de Barzilei, de la Escuela de Medicina Albert Einstein. Como director de un importante estudio llevado a cabo con personas centenarias de la comunidad judía asquenazí, Barzilei sabía que las personas longevas raramente sufren problemas como niveles elevados de glucosa en sangre o diabetes; de hecho, el procesamiento ultraeficaz de la glucosa sanguínea es uno de los indicadores de la longevidad. En su opinión, la metformina podría alterar nuestro metabolismo y hacer que se parezca más al de una persona centenaria. «Gran parte de su actividad antidiabética también modera el envejecimiento, puesto que mejora las funciones celulares y la sensibilidad a la insulina», afirma Barzilei. De hecho, él mismo la toma de forma preventiva porque tanto su padre como su madre eran diabéticos. Poco le falta para decir que toda persona mayor de 50 años debería pensar en conseguir una receta (él tiene 60). «Parece un superfármaco, que aparentemente actúa sobre múltiples aspectos del envejecimiento», opina.

«Al ritmo que avanzan las investigaciones, en los próximos 40 o 50 años será plausible un aumento de entre el 25 y el 50 por ciento de la longevidad sana»

«Los datos recabados en los pacientes a lo largo de sesenta años demuestran que actúa contra una serie de enfermedades que, en conjunto, le hacen a uno creer en que actúa contra los procesos fundamentales del envejecimiento», añade James L. Kirkland, director del Centro Robert y Arlene Kogod para la Investigación del Envejecimiento en la Clínica Mayo y colaborador en los estudios con metformina.

Sin embargo, para ensayar posibles fármacos antienvejecimiento con seres humanos, los investigadores han de superar otro obstáculo: el tiempo. Un estudio sobre la longevidad precisaría décadas hasta acabarlo; literalmente, toda una vida. Un ensayo aprobado en 2015, TAME, acrónimo de «Actuando contra el envejecimiento con metformina» (en inglés, *Targeting aging with metformin*), adopta una estrategia distinta. En vez de comparar la longevidad de los sujetos sanos que toman el fármaco con la de los que no lo toman, se limitarán a evaluar en cada sujeto la progresión de las enfermedades vinculadas con el envejecimiento.

Una de las características distintivas del envejecimiento es que las personas más ancianas contraen con frecuencia más de una enfermedad crónica, como hipertensión y diabetes o cardiopatía y trastorno cognitivo. Estas comorbilidades, enfermedades añadidas a la que ya se tiene, son una de las principales causas de sufrimiento en los mayores (por no hablar del incremento de los gastos sanitarios). En el ensayo TAME, los científicos han pensado administrar metformina a pacientes de edad avanzada que ya padecen una enfermedad ligada al envejecimiento, como la diabetes o la hipertensión. Se les supervisará durante un período de cinco a siete años y se compararán los resultados con los de un grupo de control que ha accedido a no

tomar el fármaco, para ver si contraen o no otra de las enfermedades propias del envejecimiento y si tardan más o menos en hacerlo. Si la metformina frena realmente el envejecimiento, debería evitar la aparición de las comorbilidades.

Así pues, TAME estará midiendo realmente el efecto de la metformina sobre la duración de la salud, considerándola, básicamente, un medicamento preventivo. «El mismo tipo de proceso tiene lugar, por ejemplo, cuando se recetan antihipertensivos a las personas que aún no han sufrido un ataque al corazón», afirma Kirkland.

En opinión de Barzilai, si el estudio TAME culmina con éxito y la FDA se muestra dispuesta a autorizar los ensayos con nuevos medicamentos contra el envejecimiento, las compañías farmacéuticas empezarán a moverse en esa dirección; y no solo las tradicionales, sino las empresas de nueva creación, como el proyecto Calico, respaldado por Google, cuya vicepresidenta para la investigación del envejecimiento no es otra que la propia Cynthia Kenyon, la investigadora que descubrió el gen del envejecimiento *DAF-2* hace veinte años. Según especulan algunos informes, Calico podría estar invirtiendo más de mil millones de dólares en la búsqueda de fármacos que alarguen la duración de la salud, una cifra cercana a todo el presupuesto del Instituto Nacional del Envejecimiento de EE.UU.

«Si la longevidad es un efecto secundario de la prolongación de la salud, pediremos disculpas por ello», comenta jocosamente Barzilei.

PÍLDORAS PARA LA POSTERIDAD

La gama de posibles medicamentos contra el envejecimiento ya está empezando a crecer. Por ejemplo, otro antidiabético ha alargado sustancialmente la vida de los ratones macho. A semejanza de la metformina, la acarbosa ya está aprobada para el uso en humanos, de modo que también podría ser apta para un estudio clínico del envejecimiento. Y un tercero, la hormona alfa-estradiol, también ha dado buenos resultados en el mismo tipo de ensayos clínicos que relevaron el efecto antienvejecimiento de la rapamicina.

Un nuevo y tal vez más prometedor grupo de posibles medicamentos contra el envejecimiento no actúa sobre las rutas metabólicas sino eliminando las células senescentes, aquellas que, sin haber muerto, han cesado de dividirse. Como si de zombis celulares se tratara, segregan unas pequeñas proteínas denominadas citocinas que pueden dañar las células colindantes. Kirkland cree que su verdadera función es la de servir como mecanismo de defensa contra el cáncer, un recurso a disposición del organismo para matar las células vecinas que puedan ser malignas. Las células senescentes también intervienen en la cicatrización de las heridas, porque las citocinas que segregan ayudan a coordinar el sistema inmunitario. Por desgracia, sus efectos tóxicos van más allá del entorno inmediato y contribuyen a la leve inflamación característica de los organismos que están envejeciendo, con lo que, paradójicamente, aumentan el riesgo de cáncer en los tejidos adyacentes. En opinión de Kirland y de otros investigadores, son unas impulsoras clave del envejecimiento.

Y aún peor, a medida que envejecemos, crece el número de células senescentes que alberga nuestro organismo. ¿Qué pasaría si fuésemos capaces de desprendernos de ellas? Kirkland y sus colegas, entre los que figura el biólogo molecular Jan van Deursen, de la Clínica Mayo, han demostrado que la eliminación de las células senescentes en ratones genéticamente modificados parece prolongar la duración de su salud. El problema estriba en que son muy difíciles de aislar (se hallan dispersas entre las células sanas) y aún más de matar [*véase* «Senescencia celular», por David Stipp; Investigación y Ciencia, octubre de 2012].

Un equipo de investigadores de la Clínica Mayo, del Instituto Scripps de Investigación y de otras instituciones anda buscando fármacos que puedan destruir las células senescentes promoviendo su apoptosis, o suicidio celular. En un artículo publicado en 2015 dieron a conocer el descubrimiento de tres: dos eran los antitumorales dasatinib y navitoclax, mientras que el tercero era la quercetina, un flavonoide natural. Este último es un pigmento antioxidante que está presente en la piel de las manzanas y las alcaparras, entre otros muchos alimentos.

En un experimento, los animales tenían una extremidad imposibilitada a causa de la aplicación de radiación, que había provocado una atrofia muscular similar a la pérdida de masa muscular que acarrea el envejecimiento. La radiación también crea montones de células senescentes en el músculo, circunstancia que también se ha observado en pacientes oncológicos sometidos a radiación o quimioterapia. Pues bien, los animales recuperaron casi por completo la movilidad de la extremidad tras un corto tratamiento con los fármacos. En opinión de Kirkland, el espectacular efecto se explica porque los fármacos mataron más células senescentes que de otros tipos. «Con la única dosis que administramos, la resistencia en la cinta de correr ya mejoró notablemente; y se mantuvo así durante siete meses», asegura. «Eso nos corroboró que las células senescentes estaban siendo destruidas. Y una vez muertas, muertas quedan».

Quizá tengan que morir para que podamos vivir. IyC

PARA SABER MÁS

Rapamycin fed late in life extends lifespan in genetically heterogeneous mice. David E. Harrison et al. en *Nature*, vol. 460, págs. 392-395, 16 de julio de 2009.
mTOR signaling at a glance. Mathieu Laplante y David M. Sabatini en *Journal of Cell Science*, vol. 122, págs. 3589-3594, 15 de octubre de 2009.
Rapalogs and mTOR inhibitors as anti-aging therapeutics. Dudley W. Lamming y cols. en *Journal of Clinical Investigation*, vol. 123, n.º 3, págs. 980-989, 1 de marzo de 2013.
Can people with type 2 diabetes live longer than those without? A comparison of mortality in people initiated with metformin or sulphonylurea monotherapy and matched, non-diabetic controls. C. A. Bannister et al. en *Diabetes, Obesity and Metabolism*, vol.16, n.º 11, págs. 1165-1173, noviembre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Un nuevo camino hacia la longevidad. David Stipp en *IyC*, marzo de 2012.
La ciencia de la longevidad. VV.AA., *Temas* de *IyC* n.º 69, 2012.
Cumplir los cien años. Katherine Harmon en *IyC*, noviembre de 2012.
Molécula contra la neurodegeneración. Marta Martínez Vicente y Miquel Vila en *MyC* n.º 70, 2015.





¿CUÁL SERÁ NUESTRO FUTURO COMO ESPECIE?

Ricard V. Solé

MOLDEADOS POR LA TECNOLOGÍA

LINDA BUCKLIN/ISTOCKPHOTO (*robot*); INARIK/ISTOCKPHOTO (*bebé*); ENRIQUE RAMOS LÓPEZ/ISTOCKPHOTO (*fondo*); *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA* (*composición*)



Ricard V. Solé es investigador ICREA en la Universidad Pompeu Fabra y miembro del Instituto Santa Fe, en Nuevo México. Sus investigaciones se centran en los orígenes y la evolución de la complejidad biológica.

A menudo damos por sentado que nuestra especie ha dejado de evolucionar, ya que nuestro carácter social y el inmenso impacto de la tecnología sobre el entorno nos han situado al margen de la selección natural. Sin embargo, esta afirmación es solo parcialmente cierta. La emergencia de la tecnología y su rápida propagación han marcado un punto de inflexión en nuestra relación con la naturaleza, pero no un punto final desde una perspectiva evolutiva. En el futuro, los humanos seguiremos evolucionando, solo que lo haremos de un modo particular: de la mano de la tecnología.

EN SÍNTESIS

Nuestra especie se halla inmersa en una carrera tecnológica en la que máquinas, microorganismos y humanos no solo cambiarán, sino que lo harán coevolucionando de forma cada vez más estrecha.

Tales cambios se han acelerado en las últimas décadas. El origen de dicha aceleración se remonta a la segunda mitad del siglo XX, cuando se inició una eclosión científica y técnica que alteró por completo nuestra relación con la información y la biología.

Al menos tres procesos de coevolución tecnológica moldearán nuestra especie en un futuro no tan lejano: la coevolución de nuestra capacidad de innovación con la inteligencia artificial, la de ciudades y microbiomas, y la emergencia de «cerebros híbridos» de máquinas y humanos.

Dicho proceso no es nuevo. En el pasado, el desarrollo de algunas innovaciones, como las armas de caza arrojadizas, tuvo consecuencias que modificaron la fisiología y la genética de nuestros ancestros. Cazar un animal de grandes dimensiones exige cierto grado de desarrollo muscular y estructura ósea para afrontar los peligros y la escala del enfrentamiento cuerpo a cuerpo. No obstante, una vez que aparecieron las lanzas y los arcos, la presión selectiva favoreció la habilidad para hacer diana en la presa y la cooperación entre cazadores. Esas y otras innovaciones desembocaron en cuerpos más estilizados y menos costosos desde el punto de vista de los recursos necesarios para mantener a cada miembro de un grupo. Cocinar y cortar la carne alteró también nuestros requerimientos para masticar. A medida que la comida se hizo más digerible, nuestras mandíbulas cambiaron y los dientes redujeron su tamaño, en un proceso que, previsiblemente, dará lugar a la futura desaparición de los molares posteriores, o «muelas del juicio».

Pero la intervención humana sobre la biosfera no se ha limitado a la construcción de herramientas o máquinas. También hemos modificado los seres vivos mediante un proceso de selección, dirigido a obtener las variantes de plantas y animales más útiles para disponer de reservas de alimentos abundantes y seguras. A medida que la humanidad ha ido dominando la creación de sus propios nichos ecológicos, nuestra población no ha dejado de crecer y la esperanza de vida se ha extendido de forma extraordinaria.

El control de los sistemas vivos ha pasado también por entender los patógenos y luchar contra ellos. Las infecciones y las epidemias han sido dos de los retos abordados por la ciencia desde finales del siglo XIX. Sin embargo, el triunfo de la medicina ha dado lugar a un nuevo proceso de coevolución que ha derivado en la aparición de microorganismos resistentes a los antibióticos. Como siempre ocurre en la naturaleza, las modificaciones en el entorno generan necesariamente nuevos cambios, no siempre fáciles de predecir.

Desde el siglo pasado, nuestra tecnología ha logrado dominar también la materia, modificando sus propiedades y creando sustancias inexistentes en el mundo natural, como los plásticos o los nanotubos de carbono. Y hoy estamos embarcados en dar forma al mundo vivo, cuyas propiedades son radicalmente distintas de las de la materia inerte. Estos cambios han tenido lugar en pocas décadas, y la aceleración tecnológica que estamos experimentando dará lugar a nuevas modificaciones en nuestra especie. Es precisamente de esta coevolución de la que hablaremos aquí. La tecnología de la segunda mitad del siglo XX ha adquirido un impulso y una diversidad que hacen inevitable la coevolución entre nosotros y nuestras creaciones, ya sean estas sistemas vivos o no.

INFORMACIÓN, VIDA Y EVOLUCIÓN

Los orígenes de la explosión tecnológica que vivimos hoy deben buscarse en los años cincuenta del siglo pasado, cuando se inició una revolución científica y técnica que habría de cambiar para siempre nuestra relación con la información y la biología. De forma casi simultánea, se crearon los primeros ordenadores y se descubrieron las bases moleculares de la vida. Para que la eclosión de las actuales tecnologías de la información tuviera lugar, fue preciso disponer de los componentes adecuados, pero también de un poderoso marco teórico. Gracias al genio de Alan Turing, Claude Shannon y John von Neumann se establecieron las bases de las teorías de la información y de la computación, lo que definiría en gran medida el desarrollo de los ordenadores.

También en aquella época, un físico y un biólogo un tanto iconoclastas dieron con la clave de lo que entonces se denominaba «el misterio de la herencia». James Watson y Francis Crick, con la decisiva contribución de Rosalind Franklin, demostraron que la información genética debía situarse en la doble hélice del ADN, cuya estructura permitía explicar la manera en que la información se transmite de generación en generación. Durante los años siguientes, la emergente biología molecular tomó prestados de la computación y la criptografía un buen número de conceptos. Términos como *código*, *codificación*, *traducción* o *redundancia* se incorporaron a las ciencias de la vida.

Por otra parte, las limitaciones de los ordenadores resultaron a su vez una fuente de reflexión para algunos pioneros que, por primera vez, se plantearon la

relación entre máquinas y sistemas vivos. El mismo Von Neumann llevó a cabo, en los últimos años de su corta vida, una reflexión visionaria sobre la relación entre el cerebro y las computadoras, así como sobre la posibilidad de crear máquinas capaces de reproducirse. Ambas cuestiones se encontraban muy avanzadas para su tiempo, y solo hoy podemos comenzar a abordarlas en toda su magnitud. Uno de los problemas que fascinó a este matemático, pero también a Turing, fue la posibilidad de diseñar un ordenador que, al igual que el cerebro, pudiese seguir funcionando cuando alguna de sus piezas fallase.

Dicho problema fue parcialmente resuelto con la llegada de la teoría de las redes neuronales, iniciada en la misma época por Warren McCulloch, por entonces en la Universidad de Illinois, y Walter Pitts, en la de Chicago, quienes demostraron que el cerebro es capaz de ejecutar, al menos, todas las operaciones lógicas que pueda llevar a cabo un ordenador. La comprensión de la vida desde el punto de vista de los sistemas computacionales cristalizó poco después en la creación de una nueva disciplina: la cibernética, definida por su creador, el matemático Norbert Wiener, como «el estudio del control y la comunicación en el animal y la máquina». Por primera vez, fue posible entender los mecanismos básicos asociados a la percepción del ambiente y a las respuestas a este, lo que desembocó en los primeros robots capaces de imitar, de forma simple, el comportamiento de un organismo vivo.

Nacía así una generación de científicos e ingenieros cuyo propósito no solo era entender la vida, sino también crear sistemas vivos artificiales. Por aquella época empezaron a aparecer las primeras dudas sobre los límites de la ingeniería de la vida. ¿Es posible crear sistemas vivos? ¿Existirán alguna vez máquinas inteligentes? Aunque ya entonces tales cuestiones fueron debatidas en profundidad, habría que esperar varias décadas hasta que la tecnología y nuestro conocimiento de lo vivo nos permitiesen cruzar el dominio de la especulación.

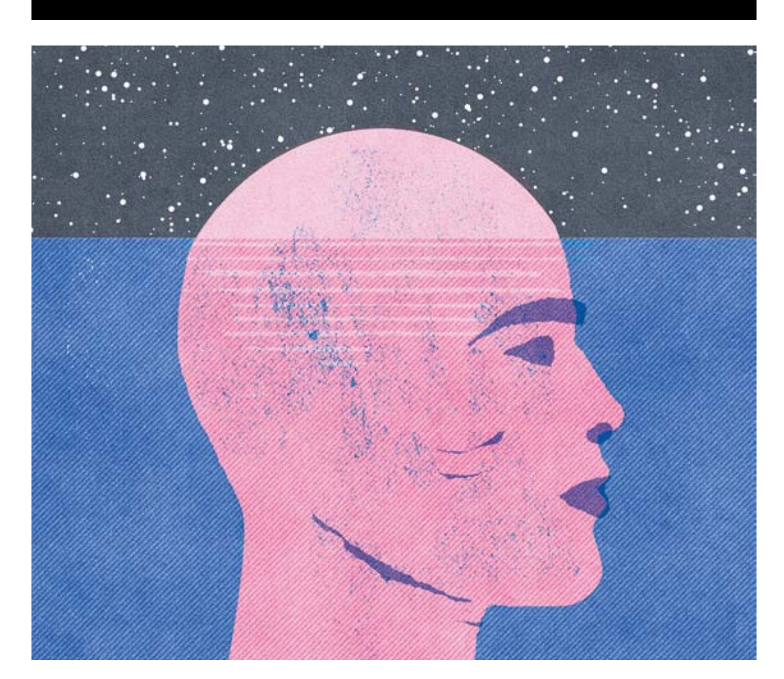
Hoy, el rápido desarrollo de la inteligencia artificial basada en el conexionismo ha hecho resurgir el interés por el desarrollo de sistemas artificiales que emulen la complejidad de la mente humana. Al mismo tiempo, el creciente control sobre los procesos vivos a nivel molecular y celular, hoy posible gracias a la biología sintética, sugiere que hemos alcanzado una nueva dimensión en nuestra relación con la materia viva. Por último, en los últimos años ha emergido una nueva imagen de nuestra especie como una ligada a una comunidad de billones de otros organismos: el microbioma humano. Todo ello nos sitúa en una posición inesperadamente nueva, en la que la propia definición de especie debe replantearse.

EL ESPÍRITU EN LA MÁQUINA

En buena medida, nuestra civilización ha tenido éxito gracias a la combinación de dos factores: la disponibilidad de fuentes de energía ricas (en particular, combustibles fósiles) y nuestra extraordinaria capacidad para generar innovaciones tecnológicas. Como resultado, ha surgido un «universo paralelo» de objetos y sistemas que, de una forma u otra, expanden nuestras capacidades físicas mucho más allá de lo que nos permitiría la biología.

Podemos decir que la tecnología se comporta, hasta cierto punto, como un reino no tan distinto de los que encontramos en la naturaleza. En este caso son las herramientas, dispositivos o formas de almacenar información no genética los que han permitido a nuestra especie hacerse cada vez más adaptable. Y ello, a su vez, se ha traducido en nuevas formas de tecnología, con máquinas que han permitido crear otras y que, al mismo tiempo, han potenciado la aparición de nuevos nichos.

Un ejemplo muy claro nos lo proporcionan los programas informáticos, claves del desarrollo tecnológico y social que vivimos hoy. Estos solo pudieron nacer con la aparición de las computadoras. Pero, una vez que los ordenadores se hicieron más asequibles y redujeron su tamaño, los programas que podían ejecutar se tornaron más complejos, lo que acabó influyendo en el desarrollo de nuevas máquinas. En un estudio reciente,





¿ENTENDEREMOS ALGUNA VEZ LA CONSCIENCIA?

«Algunos filósofos, místicos y *confabulatores nocturni* pontifican sobre la imposibilidad de entender la verdadera naturaleza de la consciencia, de la subjetividad. Sin embargo, hay pocas razones para insistir en un discurso tan derrotista y muchas para esperar con anhelo el día, no tan lejano, en el que la ciencia logrará una comprensión natural, cuantitativa y predictiva de la consciencia y de su lugar en el universo.»



CHRISTOF KOCH
Presidente y director científico del Instituto Allen de Ciencias del Cerebro, en Seattle

LORENZO GRITTI (*ilustración*); KYLE HILTON (*retrato*)

Sergi Valverde, del Instituto de Biología Evolutiva de Barcelona, y el autor de este artículo hemos analizado el árbol evolutivo de los lenguajes de programación y hemos descubierto un claro paralelismo con los procesos de coevolución en biología. El *software* ha permitido la creación de nuevos dispositivos y, a su vez, ha ido evolucionando a medida que las máquinas han adquirido nuevas prestaciones y han expandido de forma exponencial su potencia de cálculo.

Otro reflejo de la coevolución tecnológica lo hallamos en el crecimiento acelerado del número de patentes registradas a lo largo del siglo xx. Dicho proceso obedece a la creación de innovaciones previas y, sobre todo, a la interacción entre distintos campos del conocimiento. El paralelismo entre el aumento de la diversidad tecnológica y el de la variedad de especies que nos revela el registro fósil es, probablemente, resultado de algunas similitudes profundas relacionadas con la posibilidad de generar innovaciones (inventos o especies) a partir de las oportunidades que brindan las anteriores.

Esta idea ha sido formulada por el economista Brian Arthur, del Instituto Santa Fe, quien ha apuntado hacia el potencial combinatorio como la principal fuente de innovación: al combinar inventos obtenemos otros nuevos, en un proceso que se acelera de forma multiplicativa [*véase* «La innovación pierde fuelle», por Mark Buchanan; Investigación y Ciencia, mayo de 2015]. Esa aceleración forma parte de los argumentos empleados por los defensores de la idea de la «singularidad tecnológica», un término empleado por primera vez por el matemático y escritor de ciencia ficción Vernor Vinge. Se ha propuesto que, como consecuencia de la aceleración de la tecnología, llegaremos a una situación en la que vivir de forma indefinida e incluso almacenar nuestra mente en una máquina será inevitable [*véase* «Demasiado humanos», por Hillary Rosner, *en este mismo número*].

Las formas tecnológicas inspiradas en la biología se retrotraen a varios avances logrados durante las últimas décadas. En particular, en los años ochenta se produjo la explosión de la teoría de las redes neuronales, la cual permitió la creación de sistemas artificiales facultados para llevar a cabo tareas imposibles para la programación tradicional. Supongamos que deseamos crear una máquina capaz de reconocer imágenes, algo que nuestro cerebro ejecuta de forma casi automática. ¿Podemos programar un ordenador al uso para llevar a cabo esa tarea? La respuesta es negativa. Solo cuando simulamos la manera en que interaccionan las neuronas resulta posible que un dispositivo logre lo que la naturaleza lleva haciendo millones de años.

Los avances teóricos en el campo de las redes neuronales demostraron el potencial de estos sistemas para reconocer imágenes o caracteres, entre otros cometidos no triviales. Su plasticidad parecía capaz de aventajar a los métodos clásicos de la inteligencia artificial. Sin embargo, tanto un enfoque como el otro se quedaron cortos a la hora de crear sistemas que imitaran la inteligencia humana. Pero esa situación parece haber cambiado con la irrupción de sistemas neuronales artificiales que, apoyados por los avances en la potencia de cómputo, han permitido un salto cualitativo considerable.





COEVOLUCIÓN CREATIVA: Las redes neuronales artificiales ya pueden captar ciertas formas humanas de «ver el mundo». En este ejemplo, una imagen no vista con anterioridad por la máquina (*arriba*) ha sido reproducida (*abajo*) con el estilo de *La noche estrellada*, de Van Gogh (*inserto*), con resultados muy cercanos al original.

CORTESÍA DE LEON GATYS, TOMADO DE: «A NEURAL ALGORITHM OF ARTISTIC STYLE», LEON GATYS ET AL., ARXIV:1508.06576

Hoy, los sistemas de «aprendizaje profundo», los cuales pueden ser entrenados para extraer leyes generales a partir de ejemplos, han reavivado el debate sobre la posibilidad de recrear algunos aspectos de la mente humana [*véase* «Aprendizaje profundo», por Yoshua Bengio; Investigación y Ciencia, agosto de 2016]. Un ejemplo ilustrativo lo hallamos en un trabajo reciente de Leon Gatys, de la Universidad de Tubinga, y sus colaboradores, quienes hace poco lograron entrenar una red neuronal para que, tras «observar» las obras de arte de diversos pintores clásicos, adquiriese la capacidad de reinterpretar imágenes no vistas con anterioridad con el estilo del artista. Los resultados son impresionantes, ya que demuestran que, aunque el autor ya ha desaparecido, su forma de ver el mundo y de plasmarlo en una obra puede ser captada por la red neuronal.

¿Significa eso que, en un futuro, el arte estará en manos de las máquinas? Probablemente no, dado que la creatividad requiere una mente simbólica y, posiblemente, el auxilio de otros atributos, como el lenguaje o la capacidad de imaginar lo que no se encuentra ante nosotros. Con todo, si una red de neuronas artificiales

puede explorar el paisaje de posibilidades de un estilo artístico determinado, tal vez el futuro de la creación —y no solo en el dominio del arte— se vea enriquecido por la coevolución entre humanos y máquinas, donde las segundas ayudarán a los primeros a buscar nuevas posibilidades e incluso a dar con la inspiración adecuada para concebir otras formas de arte. Este será, posiblemente, uno de los procesos de coevolución que viviremos en el futuro.

UN SEGUNDO NEOLÍTICO

Durante décadas, los genes han ocupado un papel central en nuestra visión de la evolución. Sin embargo, esta necesita un organismo como unidad de selección, por lo que el estudio de los genes no basta para explicar el proceso. Un organismo constituye un sistema complejo que es —una vez más— producto de un proceso evolutivo. En este sentido, una de las grandes revoluciones en nuestra comprensión de los seres vivos, y en particular de nuestra propia especie, ha llegado al descubrir de que formamos parte de todo un ecosistema constituido por miles de otras especies: el microbioma humano, la comunidad de microorganismos que habitan en nuestro cuerpo y con los que hemos coevolucionado durante millones de años [*véase* «El ecosistema microbiano humano», por Jennifer Ackerman; Investigación y Ciencia, agosto de 2012].

El reconocimiento del microbioma humano como un supersistema de enorme importancia no llegó hasta el siglo xxi. Con anterioridad, el papel de los microorganismos en nuestra existencia había quedado relegado a la lucha contra los patógenos y una idea más o menos vaga de su relevancia en la función digestiva. Hoy, sin embargo, sabemos que el microbioma humano incluye unos tres millones de genes (en comparación, nuestro genoma cuenta apenas con unos 25.000 genes codificadores de proteínas) y que la coevolución entre nuestra especie y todas las que lo componen dista mucho de ser un proceso secundario.

Podemos decir que, en buena medida, el microbioma actúa como una interfaz entre nuestro cuerpo y el mundo exterior. Su papel podría incluso afectar al funcionamiento del cerebro. Hace un tiempo, varios trabajos interdisciplinares realizados por inmunólogos y neurocientíficos del Instituto Karolinska, en Estocolmo, demostraron que los ratones privados de microbioma experimentaban trastornos de ansiedad. Y Elaine Hsiao, de la Universidad de California en Los Ángeles, ha observado que dichos ratones presentan niveles reducidos de algunos neurotransmisores, los cuales pueden volver a su nivel normal mediante la introducción de ciertos tipos de bacterias. Algunos proyectos en marcha, como el de Rebecca Knickmeyer, de la Universidad de Carolina del Norte, están explorando ya esta conexión, la cual podría tener grandes implicaciones en la prevención de algunos trastornos [*véase* «La influencia del intestino en el cerebro», por Peter Andrey Smith; Mente y Cerebro n.º 78, 2016].

La coevolución del microbioma humano ha dado lugar a una compleja red de interdependencias, la cual se hace especialmente visible cuando tenemos en cuenta que, lejos de ser arbitrario, el microbioma se transfiere de madre a hijo durante el parto y a través de la leche materna. De esta manera, es la herencia de un microbioma concreto, y no de otro, lo que se convierte en una parte sustancial de nuestra vida y de las de nuestros descendientes. Nunca podríamos digerir numerosos alimentos si no fuera gracias a la actividad metabólica de las bacterias del intestino. Además, la ecología del microbioma —indistinguible en muchos sentidos de la de un ecosistema estándar— nos protege de todo tipo de patógenos, muchos de los cuales son incapaces de prosperar en un microbioma sano.

En los últimos años hemos comenzado a establecer una especie de «comunicación» con nuestros microbiomas, especialmente con aquellos que funcionan de manera incorrecta y, con ello, causan enfermedades autoinmunitarias o incrementan la incidencia de ciertos tipos de cáncer. En el futuro, la ingeniería del microbioma humano será uno de los frentes en los que continuará la modificación intencionada de nuestra especie. Pero aún hay más: cabe esperar que tales alteraciones afecten no solo a nuestro organismo, sino también a la mayor infraestructura creada por el ser humano: la ciudad.

La aparición de las ciudades marcó un punto de inflexión en nuestra evolución como especie. Nuestra relación con la urbe, cada vez mayor y más compleja, ha dominado por completo los flujos de energía e información a lo largo de los últimos siglos. En la primera década del milenio se produjo una transición esperada: más de la mitad de la población humana pasó a vivir en entornos urbanos, con lo que estos superaron por primera vez a los medios rurales como hábitat para nuestra civilización. Una ciudad es mucho



HÁBITAT MICROBIANO: Las ciudades han transformado nuestra relación con la naturaleza. Gracias a los avances en biología sintética, en un futuro asistiremos a la ingeniería de microbiomas humanos y urbanos, un proceso similar a la domesticación de animales y plantas que tuvo lugar durante el Neolítico.

MAMAHOOHOOBA/ISTOCKPHOTO

¿HUMANO O ROBOT? Las interacciones entre robots y humanos podrían dar lugar a situaciones completamente nuevas. Este fotograma, tomado de la película *Un amigo para Frank*, ilustra el caso de un robot que ayuda a su dueño a suplir los déficits de memoria derivados de un trastorno cognitivo. En un caso así, la red de recuerdos del sujeto, originalmente situada en el cerebro biológico, acabaría alojada en un sistema híbrido mitad humano, mitad robot.

más que un lugar en el mapa dominado por edificios y calles; es también un sistema complejo que se renueva e interacciona sin cesar con sus habitantes. En concreto, dicho sistema ha generado una fuerte relación entre los edificios y los seres humanos. No podemos decir que seamos las células que se desplazan por su interior, pero no deja de resultar interesante que la persistencia de los primeros solo sea posible si están habitados por los segundos, los cuales mantienen unas condiciones de «homeostasis» necesarias para su estabilidad.

Sin embargo, el abandono del medio natural en el que nuestra especie coevolucionó con los microorganismos ha mermado la biodiversidad necesaria para potenciar un sistema inmunitario sano. En otras palabras, la vida urbana ha modificado nuestro microbioma de forma sustancial. Por ello, cabe preguntarse si, aquí también, deberíamos iniciar un proceso de ingeniería para contrarrestar esa tendencia.

En los últimos años, el análisis de las comunidades microbianas presentes en distintas ciudades ha revelado la existencia de un microbioma urbano. David Thaler, microbiólogo de la Universidad de Basliea, ha enfatizado la importancia de conocerlo y modificarlo para ayudar a mantener nuestra salud. Tales intervenciones constituirán una nueva forma de «revolución neolítica», no dirigida hacia la domesticación de animales y plantas, sino a la ingeniería de microorganismos y sus interacciones. En este sentido, Thaler ha avanzado la posibilidad de introducir técnicas de «tomografía de edificios» para monitorizar la humedad, así como la inclusión de «microorganismos centinela»: células inocuas, seleccionadas ex profeso o modificadas artificialmente para que resulten fáciles de detectar, a fin de que puedan servir como indicadores generales de la población microbiana en las construcciones.

Aunque resulte invisible, la transformación del microbioma urbano puede constituir un evento de enorme magnitud, pues pondrá en marcha una nueva forma de relacionar escalas y fenómenos muy diversos, desde los que afectan a las bacterias, los órganos y los seres humanos, hasta aquellos relativos a los edificios y los centros urbanos de los que forman parte. Un nuevo cambio que, una vez más, llevará a la coevolución de nuestra especie y de nuestras creaciones.

HUMANBOTS, MÁS ALLÁ DE LOS CÍBORGS

Volviendo a nuestro pasado remoto y a la coevolución con otras especies, existe un elemento importante que puede enseñarnos valiosas lecciones sobre el futuro: nuestra larga historia de convivencia con algunos animales que han llegado a formar parte de nuestro entorno diario, como el ganado, los gatos y los perros. La relación con estos últimos se remonta a algunas decenas de miles de años, cuando sus antecesores comenzaron a frecuentar los asentamientos humanos en busca de restos de alimentos y, a cambio, podían alertar de la presencia de intrusos. La selección favoreció a aquellos animales que eran más dóciles y, especialmente en el caso de los perros, a los que lograban identificar con acierto las expresiones faciales humanas. En este sentido, la incapacidad de los lobos para interpretar nuestras emociones aporta una clara prueba del papel de la selección. En un futuro, dicho proceso de selección artificial y coevolución entre humanos y mascotas podría vivir un segundo acto de consecuencias inesperadas.



Muy a menudo se ha conjeturado que las máquinas gozarán algún día de una inteligencia equiparable o superior a la humana, pero es posible que algo así tarde mucho en ocurrir. En cambio, una transición importante tendrá lugar cuando los robots, aun sin ser inteligentes, comiencen a interaccionar con nosotros de forma plástica. Pensemos por un momento en la relación que los humanos mantenemos con nuestras mascotas. Perros y gatos, pese a no poder comunicarse con nosotros mediante un lenguaje complejo, generan una conexión intensa y duradera con sus dueños, la cual suele conducir a una dolorosa pérdida cuando pasan a mejor vida. ¿Podríamos empatizar con un robot de manera similar?

La respuesta es afirmativa, como demuestra lo ocurrido en Japón con los propietarios de AIBO, el célebre perro robótico de Sony que dejó de fabricarse en 2006. A partir de 2014, la compañía dejó además de proporcionar repuestos y reparar las existencias, con lo que estas acabaron «muriendo». En muchos casos, la pérdida del acompañante robótico fue seguida de un funeral sintoísta. Por tanto, debemos preguntarnos si, en un futuro no tan lejano, nuestras mascotas robóticas coevolucionarán con nosotros. Cuando los primeros lobos comenzaron a frecuentar asentamientos humanos, se inició un proceso de domesticación en el que los cánidos se adaptaron a un nuevo nicho ecológico en el que podían encontrar alimento y, como contrapartida, dar señales de alarma ante una amenaza externa. En nuestro mundo tecnológico, una coevolución así también tendrá lugar, aunque la selección estará relacionada con la comunicación y con ciertas cuestiones emocionales.

Un aspecto especialmente interesante de la futura evolución compartida entre humanos y robots tiene que ver con la aparición inevitable de lo que he denominado el *humanbot*. La idea de fondo es sencilla. Un robot capaz de comunicarse y de aprender, y que se encuentre dotado de una potente memoria que pueda compartir con un humano durante un tiempo prolongado, desarrollará una serie de atributos que acabarán formando parte simultánea de ambos agentes. Imaginemos un robot que, durante décadas, ha almacenado en su interior los recuerdos de su dueño, o al menos parte de estos. Una situación parecida la encontramos en la película de 2012 *Un amigo para Frank*. Su protagonista es un hombre de edad avanzada que experimenta las primeras dificultades causadas por un deterioro cognitivo y que debe ayudarse de un robot para sus tareas cotidianas (y para algunas no tan cotidianas). Resulta imposible encapsular la memoria de Frank y la del robot en compartimentos separados: una y otra constituyen una red de recuerdos capaces de interaccionar con el cerebro que los creó. Frank depende cada vez más de la memoria —sesgada e incompleta— de la máquina, la cual no ha dejado de moldear sus recuerdos hasta darles una forma en ocasiones alejada de la original.

Ese tipo de interdependencia podría dar lugar a situaciones peculiares, sobre todo si tenemos en cuenta ciertas propiedades de la memoria y de cómo se establece. El cerebro que envejece se enfrenta a varios problemas relacionados con la calidad y la organización de las distintas clases de memoria. Así ocurre, por ejemplo, con la capacidad para recordar nombres de personas o lugares, la cual disminuye con la edad. En tal caso, un robot que pudiera refrescarnos la memoria nos sería de gran ayuda. Si se tratara, por tomar un caso extremo, de una persona que padece alzhéimer (como ocurre con Frank en la película), el resultado de la interacción entre ambos sería un individuo con una facultad mermada para recordar y tomar decisiones por sí mismo, pero apoyado, tal vez de forma muy considerable, por una máquina que puede asistirle en sus recuerdos y ayudarle a manejarse en su entorno, incluida su relación con otras personas.

La memoria y las capacidades cognitivas de la red neuronal artificial podrían acabar supliendo las carencias o incluso parte de la personalidad del sujeto humano. Aquí nos hallaríamos en una tierra de nadie en lo que respecta a la frontera que separa la mente de la máquina: ambas terminan por darse forma mutuamente y nada puede evitar que, en un momento dado, la experiencia consciente —que solemos localizar en el cerebro biológico— acabe siendo compartida por la parte artificial.

¿Qué tipo de sistema se habrá generado? Creo que es razonable pensar que nos encontraríamos ante un híbrido que no puede ya disociarse en partes independientes. Y esta intersección dará lugar a dilemas complejos. La desaparición de cualquiera de los dos componentes tiene consecuencias, si bien distintas. Si el robot deja de funcionar, el humano dependiente puede experimentar un colapso cognitivo. Pero, si es el humano quien desaparece, ¿qué nos queda del lado artificial? Del mismo modo que no nos deshacemos de fotografías u objetos personales de un familiar fallecido, habrá que preguntarse qué hacer con los trazos de la mente humana que han quedado almacenados en la red robótica. Y, al igual que ocurre con la red neuronal que parece recrear rasgos de la mente de Van Gogh, tendríamos que saber si el agente artificial guarda en su interior trazos de su compañero humano. Tales situaciones plantearán todo tipo de interrogantes prácticos y filosóficos para los que, por el momento, no tenemos respuesta.

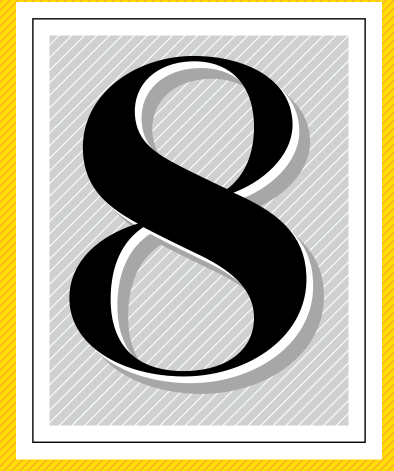
PARA SABER MÁS

Punctuated equilibrium in the large-scale evolution of programming languages. Sergi Valverde y Ricard Solé en *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 12, n.º 107, junio de 2015.
Toward a microbial Neolithic revolution in buildings. David Thaler en *Microbiome*, vol. 4, n.º 14, marzo de 2016.
Synthetic transitions: Towards a new synthesis. Ricard Solé en *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 371, n.º 1701, julio de 2016.
Rise of the humanbot. Ricard Solé en *Frontiers in Neurorobotics*; en prensa.

EN NUESTRO ARCHIVO

El *Homo sapiens* del futuro. Peter Ward en *IyC*, enero de 2009.
Ciudades: Claves para comprender la complejidad urbana. Número monográfico de *IyC*, noviembre de 2011.
Complejidad, tecnología y sociedad. Carlos Gershenson en *IyC*, enero de 2015.
Computadoras biológicas. Timothy K. Lu y Oliver Purcell en *IyC*, agosto de 2015.
Hacia una bioingeniería del planeta. Ricard V. Solé, Raúl Montañez y Salva Duran-Nebreda en *IyC*, agosto de 2015.





¿ES DESEABLE LA INMORTALIDAD QUE CONTEMPLA EL TRANSHUMANISMO?

Hillary Rosner

MÁS QUE HUMANOS

ANDREW MYERS (*fotografía*); ANGELA CAMPOS, STOCKLAND MARTEL (*composición*)



Hillary Rosner es escritora. Ha colaborado con *National Geographic*, *The New York Times* y *Wired*, entre otras publicaciones. En 2010 y 2013 obtuvo el Premio Kavli de Periodismo Científico de la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia.

Hace poco, en un banquete de boda, pregunté a algunas amistades sobre la inmortalidad. «Suponed que pudierais transferir vuestra mente a un ordenador y vivir para siempre como un híbrido, mitad humano y mitad máquina», inquirí a una pareja culta de San Francisco y padres de dos niñas. «¿Lo haríais?» El marido, de 42 años y con un doctorado en medicina, no dudó ni un segundo en responder que sí. Los resultados de su investigación actual, me explicó, solo darían fruto en los próximos siglos, y él deseaba verlos. «Además, me gustaría saber cómo será el mundo dentro de 10.000 años», añadió. La esposa, de 39 años y doctora en historia del arte, fue también tajante: «De ninguna manera», afirmó. «La muerte es parte de la vida. Quiero saber en qué consiste morir.»

EN SÍNTESIS

Algunos expertos creen que la tecnología nos permitirá algún día transferir nuestra mente a un cuerpo robótico, con lo que alcanzaremos la inmortalidad. Otros, por el contrario, lo consideran imposible.

Con independencia de su viabilidad, varios filósofos reconocidos han comenzado ya a debatir la manera en que dicho acontecimiento, conocido como «singularidad», podría cambiar la naturaleza humana.

El debate reviste importancia ya que, aunque la singularidad nunca suceda, los aumentos de mente y cuerpo que previsiblemente sí nos depara la tecnología plantean cuestiones similares.

Me pregunté si la decisión de la mujer habría instado al marido a reconsiderar sus ideas, pero, diplomáticamente, decidí dejarlo estar. Sin embargo, la pregunta iba más allá de una simple charla de mesa. Si damos crédito a algunos futuristas, tarde o temprano habremos de enfrentarnos a tales cuestiones. Según ellos, nos encaminamos hacia un mundo postbiológico en el que la muerte quedará, si no superada, sí al menos bajo control.

La recreación más sólida de ese futuro se la debemos al inventor e ingeniero de la computación Raymond Kurzweil. En su superventas de 2005 *La Singularidad está cerca*, Kurzweil asegura que, dentro de poco, la inteligencia artificial abarcará «toda la competencia y el conocimiento humanos», y que las técnicas de escáner cerebral a escala nanométrica permitirán «la transferencia gradual de nuestra inteligencia, personalidad y habilidades hacia el segmento no biológico de nuestra inteligencia». Al mismo tiempo, miles de millones de nanorrobots en el interior de nuestros cuerpos «destruirán patógenos, corregirán errores genéticos, eliminarán toxinas y llevarán a cabo muchas otras tareas para aumentar nuestro bienestar. Como resultado, podremos vivir indefinidamente sin envejecer». Según este autor, tales nanorrobots crearán una realidad virtual desde el interior del sistema nervioso. Cada vez viviremos más en semejante reino virtual, completamente indistinguible de ese universo anémico al que podríamos llamar «realidad real».

A partir de los avances en genética, nanotecnología y robótica, y teniendo en cuenta la tasa exponencial del cambio tecnológico, Kurzweil pronostica que la singularidad (el momento en que la inteligencia no biológica superará a toda la inteligencia humana, provocando con ello una profunda transformación de nuestras capacidades) llegará hacia 2045. Hoy esa predicción es secundada por otros expertos, más alentados si cabe por los recientes avances en la técnica de inteligencia artificial conocida como aprendizaje profundo [*véase* «Aprendizaje profundo», por Joshua Bengio; Investigación y Ciencia, agosto de 2016].

No obstante, la mayoría de los científicos opinan que toda manifestación de nuestro destino como cíborgs queda aún muy lejos. Sebastian Seung, del Instituto de Neurociencias de Princeton, cree que jamás será posible volcar la mente humana en un ordenador. Nuestro cerebro se compone de unos 100.000 millones de neuronas, las cuales se encuentran unidas entre sí mediante sinapsis. La totalidad de tales conexiones constituye el conectoma, considerado por algunos expertos la llave de nuestra identidad. Incluso acogiéndonos a los estándares de Kurzweil sobre el progreso tecnológico, se trataría de un número demasiado elevado de conexiones para cartografiarlas y trasladarlas a una máquina. Y puede que el conectoma no sea sino el principio: las neuronas se comunican entre sí más allá de las sinapsis, y tales interacciones extrasinápticas podrían resultar esenciales para la función cerebral. En su libro *Conectoma*, de 2012, Seung argumenta que, si realmente ocurre así, transferir nuestra mente no solo requerirá incluir todas las neuronas y sus conexiones, sino también cada átomo. La potencia computacional que exigiría eso, escribe el investigador, «está totalmente fuera de discusión, a menos que nuestros descendientes remotos sobrevivan escalas de tiempo galácticas».

Sin embargo, aunque un futuro cíborg se antoje muy remoto o implausible, su mera posibilidad suscita cuestiones lo bastante importantes como para haber llamado la atención de algunos filósofos. E incluso si nunca alcanzamos el futuro aventurado por Kurzweil, el previsible aumento de nuestras mentes y cuerpos puede llevarnos parcialmente hacia allí, lo que plantea varias preguntas sobre qué nos hace humanos.

David Chalmers, filósofo y codirector del Centro para la Mente, el Cerebro y la Consciencia de la Universidad de Nueva York, ha escrito sobre cuál sería la mejor manera de transferir la mente a una máquina para preservar la propia identidad. Al ser preguntado sobre si cree que tendrá la oportunidad de vivir para siempre, Chalmers, de 50 años, responde que no, pero sostiene que tales procesos serán posibles en el próximo siglo. Ronald Sandler, experto en ética ambiental y jefe del departamento de filosofía y religión de la

Universidad Noroccidental de EE.UU., opina que nuestro futuro cíborg pone sobre la mesa un montón de debates. «Pensar sobre el caso límite puede enseñarnos a analizar situaciones más próximas», aduce.

Y, por supuesto, si realmente existe una mínima posibilidad de que aquellos que hoy estamos vivos podamos elegir un día entre morir o convertirnos en cíborgs, tal vez lo mejor sea comenzar a reflexionar sobre ello ahora. Así pues, dejando a un lado las cuestiones sobre su viabilidad, merece la pena considerar algunas preguntas fundamentales. ¿Es deseable? Si mi mente y mi consciencia fuesen transferidas a un cíborg, ¿quién sería «yo»? ¿Amaría todavía a mi familia y amistades? ¿Me amarían ellas a mí? ¿Seguiría siendo humana?

Una de las cuestiones analizadas históricamente por los filósofos es la manera en que las personas nos tratamos unas a otras. ¿Continuaremos teniendo una Regla de Oro en un mundo posthumano? Hace unos años, Sandler escribió un artículo titulado «Transhumanismo, dignidad humana y estatus moral», en el que argumentaba que los humanos aumentados aún mantendrían una obligación moral hacia los humanos normales. «Aunque llegases a estar aumentada de alguna manera, aún tendrías que preocuparte por mí», me comenta. Algo así parece difícil de rebatir... pero más difícil aún es creer que llegará a ocurrir.

Otros filósofos defienden el «aumento moral»: el empleo de recursos médicos o biomédicos para actualizar nuestros principios. Si vamos a disponer de un poder e inteligencia enormes, habremos de hacer algo para asegurarnos de que el Dr. Mal no quede al mando. En este sentido, los filósofos Julian Savulescu e Ingmar Persson, de la Universidad de Oxford, escribieron hace poco: «[La ciencia] está comenzando a permitirnos modificar directamente las bases físicas y biológicas de la motivación humana, ya sea con ayuda de fármacos, mediante selección o ingeniería genéticas, o recurriendo a elementos externos que afectan al cerebro o a los procesos de aprendizaje. Podríamos usar tales técnicas para superar las limitaciones morales y psicológicas que ponen en peligro a la especie humana» [*véase* «¿Píldoras para la moral?», por V. Wildermuth; Mente y Cerebro n.º 68, 2014].

En una tribuna del *Washington Post* titulada «Pronto emplearemos la ciencia para hacer a la gente más moral», James Hughes, experto en bioética y rector asociado de la Universidad de Massachusetts en Boston, defendía el aumento moral argumentando que tendría que ser más voluntario que forzoso. «Con la ayuda de la ciencia, podremos descubrir nuestro propio camino hacia una felicidad y virtud posibilitadas tecnológicamente», escribía Hughes, quien dirige el Instituto de Ética y Tecnologías Emergentes, un laboratorio de ideas transhumanista.

Otra pregunta atañe a nuestra relación con el planeta. Vivir para siempre, sea en la forma que sea, cambiaría nuestro vínculo no solo con las personas, sino también con el mundo que nos rodea. ¿Nos preocuparíamos más o menos por el entorno? ¿Mejoraría o empeoraría el mundo natural?

¿COLONIZAREMOS EL ESPACIO EXTERIOR?

«Depende de qué entendamos por "colonizar". Si se trata de llevar robots a otros planetas, ya lo hemos hecho. Si significa enviar microorganismos, conseguir que persistan y quizá que proliferen, entonces, por desgracia, no es improbable que lo hayamos hecho también: posiblemente en Marte, con la nave *Phoenix* y casi con seguridad con el vehículo explorador *Curiosity*, que cuenta con una fuente de calor y que no fue esterilizado de igual modo que la sonda *Viking*.

Si hablamos de que los humanos vivan en otros lugares durante largos períodos de tiempo pero sin reproducirse, algo así podría ocurrir dentro de unos cincuenta años. No obstante, si de lo que se trata es de construir un entorno que se sustente a sí mismo y en el que los humanos puedan vivir de modo indefinido sin más auxilio que una modesta ayuda por parte de la Tierra (y esta es la definición práctica de colonia, al menos si nos atenemos a las que en su día estableció Europa fuera del continente), creo que eso solo sucederá en un futuro muy remoto, suponiendo que sea posible en absoluto.

Hoy sabemos muy poco sobre cómo construir un ecosistema cerrado y resistente a las perturbaciones ocasionadas por la introducción de nuevos organismos o por acontecimientos no biológicos (como en *Biosfera 2*, por ejemplo). Creo que ello supone un problema mucho más difícil de lo que la gran mayoría de quienes propugnan la colonización espacial percibe. Primero habría que resolver una larga serie de problemas técnicos; entre ellos, el del tratamiento del aire. Por el momento, ni siquiera hemos colonizado ninguna región subacuática de la Tierra. Asentarnos en un lugar en el que apenas si hay atmósfera resultará mucho más complicado.»



CATHARINE A. CONLEY
Responsable de protección planetaria de la NASA

KYLE HILTON (*retrato*)

La singularidad, explica Sandler, describe un estado final. Llegar a ella requiere una enorme cantidad de cambios tecnológicos. «Y nada modifica nuestra relación con la naturaleza de forma más rápida y definitiva que la tecnología», argumenta. Si hemos llegado al punto en que podemos transferir la consciencia humana a una máquina y movernos con fluidez entre la realidad virtual y la no virtual, la ingeniería habrá modificado prácticamente todo lo demás. «Cuando llegue la singularidad, nuestra relación con la naturaleza ya se habrá transformado de manera radical», observa el investigador.

Aunque nos gustaría creer lo contrario, en nuestro estado mortal actual somos enormemente dependientes de los sistemas naturales, así como vulnerables a ellos. Sin embargo, en ese mundo futuro, tales relaciones de subordinación cambiarían. Si no necesitáramos pulmones para respirar, ¿por qué debería preocuparnos la contaminación del aire? Y, si se diera el caso de que ya no precisamos cultivar alimentos, nos habríamos desconectado de manera fundamental de la tierra que nos rodea.

Por otra parte, en un mundo en el que lo real resulta indistinguible de lo virtual, una naturaleza recreada con medios digitales podría brindarnos beneficios equivalentes a los que hoy nos ofrece el mundo exterior. Nuestra relación con la naturaleza se vería alterada. Ya no sería sensorial, física. Eso podría ejercer profundos cambios en nuestro cerebro, quizá también en sus versiones de silicio. La ciencia nos ha enseñado que la interacción con la naturaleza nos afecta profundamente, y que lo hace para mejor. Un vínculo con lo natural, incluso a nivel inconsciente, puede que constituya una cualidad básica del ser humano.

Si dejamos de depender de la naturaleza, y si nuestra capacidad física para comulgar con ella disminuye, «las bases de la concienciación ambiental bascularán con fuerza hacia una responsabilidad *per se* para con la naturaleza», sostiene Sandler. Nuestro potencial para solucionar problemas ambientales —modificando artificialmente el clima, pongamos por caso— estará mucho más allá de lo que hoy podemos imaginar. Pero ¿seguiremos pensando en la naturaleza como en algo con valor intrínseco? De ser así, a los ecosistemas les irá mejor. En caso contrario, otras especies podrían verse en problemas.

Nuestra relación con el entorno es también una cuestión de escalas de tiempo. Desde una perspectiva geológica, puede que la extinción a la que estamos asistiendo en la actualidad no importe mucho. Sin embargo, sí importa desde el punto de vista de lo que hoy dura una vida humana. ¿Cómo cambiaría una longevidad extrema la manera en que pensamos sobre el entorno?, se pregunta Sandler. «Las escalas de tiempo determinan enormemente cuáles son las respuestas razonables», apunta el investigador. ¿Nos preocupará más el medio natural porque vivimos mucho más? ¿O nos interesará menos porque habremos adoptado una óptica geológica? «Resulta prácticamente imposible de imaginar», señala, «pero podemos afirmar que será una perspectiva muy, muy distinta».

Hablar con expertos sobre estos temas durante un tiempo prolongado es como caer en la madriguera de Alicia: uno acaba manteniendo conversaciones aparentemente normales sobre cuestiones absurdas. «Si existiera algo similar a una terapia génica al estilo de la Patrulla X, mediante la cual las personas pudieran disparar rayos láser con los ojos o controlar otras mentes», me explica Hughes, «quienes deseasen disfrutar de esos rasgos tendrían que someterse a un entrenamiento especial y obtener una licencia».

«¿Emplea esos ejemplos para ilustrar algo, o realmente cree que va a suceder?», le pregunto. Su respuesta da un rodeo: «Desde el punto de vista de cuánto hablamos los transhumanistas sobre estos temas, la mayoría intentamos no asustar demasiado a los recién llegados. Pero, una vez superado el nivel de conmoción 4, podemos acabar considerando el momento en que todos seremos nanorrobots».

Cuando seamos nanorrobots, ¿qué nos preocupará? Al fin y al cabo, sentir angustia probablemente sea uno de los rasgos que nos definen como humanos. ¿Quedará ello obsoleto con la inmortalidad? Si no tuviera que preocuparme por mi salud, por pagar las facturas y por cómo me las arreglaré cuando sea demasiado anciana para viajar por el mundo y escribir artículos, ¿seguiría siendo yo? ¿O me habré transformado en un plácido y despreocupado robot? ¿Con qué fantasearía? ¿Desaparecerían mis ambiciones actuales? Si viviera para siempre, la Gran Novela Americana seguramente podría esperar un siglo más.

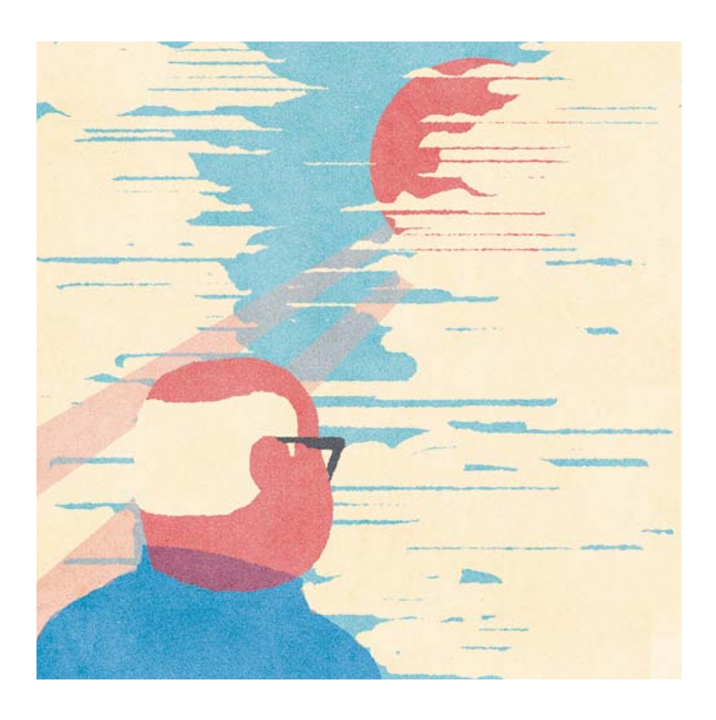
¿DESCUBRIREMOS UNA SEGUNDA TIERRA?

«Apuesto a que sí. Hoy sabemos que los planetas en torno a otras estrellas son mucho más abundantes y diversos de lo que nadie había imaginado hace dos décadas. También hemos visto que el ingrediente esencial para la vida en este planeta, el agua, es común en el espacio. Parece que la naturaleza ha dispuesto las cartas a favor de una amplia variedad de planetas, incluidos aquellos parecidos a la Tierra. No tenemos más que buscarlos.»



AKI ROBERGE
Investigadora experta en exoplanetas del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA

KYLE HILTON (*retrato*)



¿DESCUBRIREMOS UNA CURA PARA EL ALZHÉIMER?

«No estoy segura de que vayamos a lograr una cura como tal, pero sí albergo grandes esperanzas de que, de aquí a unos diez años, surja una terapia que modifique el curso de la enfermedad. Ya existen ensayos de prevención en los que se practican intervenciones biológicas antes de que aparezcan los síntomas. Y no tenemos que curar el alzhéimer: basta con retrasar la aparición de la demencia entre cinco y diez años. Según varias estimaciones, un retraso de cinco años de la terrible y costosa fase de demencia reduciría el gasto que esta implica para Medicare (el sistema de asistencia médica en EE.UU.) en casi un 50 por ciento. Y, más importante aún, muchas personas mayores morirían en la sala de baile en vez de en una residencia.»



REISA SPERLING
Catedrática de neurología de la escuela de medicina de Harvard y directora del Centro para la Investigación y el Tratamiento del Alzhéimer

¿Seguiría siendo yo? Chalmers opina que esta será una cuestión no solo filosófica, sino también muy práctica. Intuitivamente, parece poco plausible que sigamos siendo nosotros mismos si transferimos nuestra mente a una máquina; también si, como ha postulado Chalmers, el proceso se hiciese neurona a neurona y permaneciésemos conscientes a medida que nos tornamos un 1 por ciento de silicio, luego un 5, un 10... como el barco de Teseo, cuyos maderos se fueron reemplazando uno a uno. Al final, ¿era el mismo barco o no? Y si no lo era, ¿en qué momento dejó de serlo?

«Un gran problema», señala Hughes, «es que hayas vivido tanto tiempo y hayas experimentado tantos cambios que la longevidad haya perdido su significado. ¿Soy realmente el mismo que cuando tenía cinco años? Y si viviera otros 5000, ¿sería la misma persona que hoy? En el futuro podremos compartir nuestros recuerdos, lo que conllevará una erosión de las nociones de identidad personal y de continuidad».

A pesar de la retórica utópica de la singularidad, la idea arrastra también un tinte fatalista. Es el único camino disponible: fusionarnos con máquinas o desaparecer... o algo peor. ¿Y qué ocurre si no deseo transformarme en un cíborg? Kurzweil replicaría que semejante idea no es más que el resultado de mi limitado y defectuoso cerebro biológico, que me impide ver el potencial y el atractivo de ese futuro. Y que todo aquello a lo que tendré acceso —la elección de cualquier tipo de cuerpo, posibilidades ilimitadas para la expresión creativa, la oportunidad de colonizar el espacio— hará que mi actual existencia biológica parezca trivialmente cómica. Al fin y al cabo, ¿qué es más fatalista que una muerte segura?

Sin embargo, me gusta ser humana. Me gusta saber que estoy hecha del mismo tipo de material que el resto de los seres vivos sobre la Tierra. Me siento incluso apegada a mi fragilidad, y prefiero ser agradable y afectuosa antes que dura e indestructible, como un superrobot de una película de acción. Me gusta la sangre caliente que corre por mis venas, y no estoy segura de querer cambiarla por nanorrobots.

Algunos expertos en ética afirman que la felicidad humana se fundamenta en el hecho de que nuestras vidas son fugaces, en que somos criaturas vulnerables e interdependientes. En un futuro de humanos-máquina, ¿cómo encontraríamos valor y sentido a la vida?

«Para mí, la esencia del ser humano no está en nuestras limitaciones, [...] sino en nuestra capacidad para superarlas», escribe Kurzweil. Es un punto de vista atractivo. La muerte siempre ha sido una de esas limitaciones. ¿Tal vez vencerla nos haga profundamente humanos?

Sin embargo, una vez superada la muerte, no parece seguro que nuestra humanidad permanezca. Por supuesto, la muerte no nos define —todos los seres vivos mueren—, pero ser conscientes de ella, comprenderla y buscar un sentido a la vida que hay en medio forman, seguramente, parte del espíritu humano.

LORENZO GRITTI (*ilustración*); KYLE HILTON (*retrato*)

PARA SABER MÁS

Citizen cyborg: Why democratic societies must respond to the redesigned human of the future. James Hughes. Basic Books, 2004.
The Singularity is near: When humans transcend biology. Raymond Kurzweil. Viking, 2005.
Brain cuttings: Fifteen journeys through the mind. Carl Zimmer. Scott & Nix, 2010.
Connectome: How the brain's wiring makes us who we are. Sebastian Seung. Houghton Mifflin Harcourt, 2012.
When computers surpass us. Christof Koch en *Scientific American Mind*, septiembre-octubre de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Transhumanismo: entre el mejoramiento y la aniquilación. A. Diéguez, *en este mismo número*.





¿CUÁNTO DURARÁ LA ESPECIE HUMANA?

David Grinspoon

SUPERVIVENCIA PROFUNDA

El mayor debate entre quienes estudian el Antropoceno gira en torno al momento exacto en que comenzó una época geológica marcada por la influencia humana. Como astrobiólogo dedicado a estudiar las grandes transiciones históricas de la evolución planetaria, a mí me interesa más otra pregunta: ¿cuándo, y cómo, terminará el Antropoceno?





David Grinspoon es astrobiólogo en el Instituto de Ciencias Planetarias de Tucson, en Arizona, y autor de *Earth in human hands: Shaping our planet's future* (Grand Central Publishing, de próxima aparición).

EN SÍNTESIS

El Antropoceno, la época geológica caracterizada por la huella del ser humano sobre el planeta, acaba de comenzar. ¿Marcará el inicio de una transición aún mayor?

Para que eso suceda, nuestra especie tendrá que superar varias amenazas existenciales en distintas escalas de tiempo: desde el crecimiento demográfico y el impacto de asteroides, hasta futuras glaciaciones e incluso el envejecimiento gradual del Sol.

En caso de lograrlo, el ser humano podría llevar al planeta hacia un nuevo eón geológico: el Sapiezoico, caracterizado por una inteligencia colectiva que estabilizaría los sistemas naturales terrestres y extendería la biosfera a otros lugares del cosmos.

En geología, las épocas abarcan períodos relativamente cortos. Mucha mayor trascendencia revisten los límites entre las fases más largas de la escala geológica: los eones, intervalos de miles de millones de años, cuyas transiciones marcan cambios profundos y permanentes en la historia del planeta. De las condiciones infernales del eón Hádico, la Tierra pasó después al Arcaico, más frío y tranquilo, en el que se gestó la vida. Durante el Proterozoico, algunos de aquellos microorganismos primigenios transformaron por completo el planeta al inundar la atmósfera con oxígeno fotosintético. Ese cambio envenenó gran parte de la biosfera, pero también conllevó el florecimiento de la vida multicelular compleja. Ello dio origen al eón actual, el Fanerozoico.

Tal vez el Antropoceno marque el inicio de otra transición fundamental. El quinto eón podría quedar definido por un tipo radicalmente nuevo de cambio global: uno en el que los procesos cognitivos (los pensamientos y las creaciones de los humanos) adquieran un papel clave en la dinámica del planeta. Propongo designar ese eón potencial *Sapiezoico*, por «vida sabia».

Por primera vez en la historia de la Tierra, una fuerza geológica consciente está modelando el planeta. Pero una época solo se convierte en eón si se prolonga durante cientos de millones de años o más. Para que eso ocurra, la humanidad deberá sobrevivir todo ese tiempo. ¿Lo lograremos?

EVITAR LA EXTINCIÓN

Los retos más inmediatos para el próximo siglo consisten en estabilizar nuestra población y construir sistemas energéticos y agrícolas que no destruyan el entorno natural. No cabe duda de que antes o después abandonaremos los combustibles fósiles, pero la velocidad a la que lo hagamos determinará si el sufrimiento que causarán las alteraciones climáticas del siglo XXI será igual o peor que el que provocaron las guerras, revoluciones y hambrunas del siglo XX.

El calentamiento global antropogénico nos ha hecho abrir los ojos a nuestro inevitable papel como operadores a escala planetaria. Pero no es el único problema a largo plazo al que nos enfrentamos. En los siglos venideros, también habremos de idear defensas contra asteroides y cometas peligrosos. Un objeto mucho menor que la roca de diez kilómetros que exterminó a los dinosaurios podría bastar para destruir la civilización humana. Pronto habremos catalogado la mayoría de los asteroides amenazantes que cruzan la órbita terrestre; sin embargo, siempre podrá llegar uno disparado desde los márgenes del sistema solar sin dar apenas señales de aviso. Nuestra especie deberá prepararse para poder desviar un intruso de semejantes características.

En una escala temporal mayor, de decenas de miles de años, tendremos que aprender a prevenir cambios climáticos naturales mucho más acusados que el episodio de calentamiento actual. Nuestra civilización se ha desarrollado a lo largo de un período que, en esencia, puede considerarse un verano de 10.000 años, varios milenios de clima inusualmente cálido y estable. Tales condiciones no perdurarán, a no ser que decidamos que persistan. La Tierra experimenta ciclos de glaciaciones y calentamiento en escalas de decenas de miles o incluso millones de años. Una nueva edad de hielo destruiría en gran medida la agricultura y, con ella, la civilización, al tiempo que causaría la extinción de innumerables especies. Las técnicas de geoingeniería destinadas a enfriar o calentar artificialmente el planeta podrían librar al Sapiezoico de tales fluctuaciones climáticas destructivas.

Hoy, gran parte del debate en torno a la geoingeniería se centra en medidas desesperadas a corto plazo para mitigar los daños climáticos que nosotros mismos nos hemos infligido. Sin embargo, nuestra actual ignorancia sobre la complejidad del clima terrestre convierte tales intentos en algo excesivamente arriesgado. La geoingeniería debe entenderse más como un proyecto para un futuro lejano, cuando conozcamos en profundidad el sistema terrestre y este haya alcanzado unas condiciones climáticas extremas, bien debido a fluctuaciones intrínsecas, o —más lejos aún— porque nuestro astro rey esté alcanzando su senectud.

Las estrellas similares al Sol se tornan más luminosas con la edad. Dentro de algunos miles de millones de años, nuestros océanos se evaporarán, tal y como ocurrió con los de Venus hace miles de millones de años. Por fortuna, eso aún tardará mucho en llegar. Si superamos las amenazas existenciales a corto y medio plazo, tendremos tiempo suficiente para afrontar el

¿SOBREVIVIRÁ *HOMO SAPIENS* DURANTE LOS PRÓXIMOS 500 AÑOS?

«Diría que las probabilidades son altas. Ni siquiera las mayores amenazas (una guerra nuclear o una catástrofe ecológica, tal vez derivada del cambio climático) son existenciales en el sentido de que vayan a exterminarnos por completo. Y la amenaza de que nuestros descendientes electrónicos nos superen y decidan vivir sin nosotros puede evitarse desconectándolos.»



CARLTON CAVES
Catedrático de física y astronomía en la Universidad de Nuevo México.





¿ESTAMOS MÁS CERCA DE EVITAR UN HOLOCAUSTO NUCLEAR?

«Desde el 11-S, EE.UU. ha intentado atajar un posible atentado nuclear incrementando la seguridad del uranio y el plutonio altamente enriquecidos y sacándolos del mayor número posible de localidades. Un ataque terrorista nuclear podría matar a 100.000 personas. Tres décadas después del final de la Guerra Fría, sin embargo, el peligro de un gran holocausto nuclear, con miles de explosiones y decenas o centenas de millones de muertes inmediatas, aún persiste en la confrontación entre Rusia y Estados Unidos.

Tras Pearl Harbor, EE.UU. dispuso su arsenal nuclear para hacer frente a un posible ataque sorpresa en el que la Unión Soviética intentase destruir todas las fuerzas estadounidenses accesibles. Hoy no cabe esperar una ofensiva así, pero cada bando sigue manteniendo unas 1000 ojivas en misiles balísticos submarinos e intercontinentales para ser lanzados en caso de alerta. Dado que el tiempo de vuelo de un misil es de entre 15 y 30 minutos, una decisión que podría derivar en cientos de millones de muertes tendría que tomarse en cuestión de minutos. Eso deja la puerta abierta a una guerra nuclear accidental o incluso al lanzamiento de misiles por piratas informáticos.

Estados Unidos no necesita mantener esa posición con fines disuasorios, ya que en todo momento dispone de unas 800 ojivas distribuidas en submarinos inalcanzables. Sin embargo, en caso de guerra, tanto el Comando Estratégico de EE.UU. como la Fuerza de Misiles Estratégicos rusa querrán usar sus arsenales terrestres antes de que puedan ser destruidos. La Guerra Fría ha concluido, pero la gran Máquina del Juicio Final que resultó de aquella confrontación aún sigue con nosotros. Y es delicada.»

FRANK VON HIPPEL
Catedrático emérito de la Escuela Woodrow Wilson de Asuntos Públicos e Internacionales de la Universidad de Princeton y cofundador del Programa de Ciencia y Seguridad Global de dicha universidad.



problema. Quizá podamos rejuvenecer el Sol de alguna manera, llevar la Tierra a una órbita más amplia o apantallar parcialmente nuestro planeta. Si no, tal vez decidamos emigrar a un sistema planetario más joven.

EL MUNDO EN NUESTRAS MANOS

Si aquí la inteligencia puede emerger como una fuerza geológica consciente de sí misma, probablemente pueda hacerlo también en otros lugares. A medida que nos asomemos a las profundidades del universo, tal vez descubramos que existen tres tipos de mundos: inertes, vivos y sapientes. Por supuesto, existe la posibilidad de que el nuestro sea el único mundo sapiente de un cosmos por lo demás vasto y silencioso. De ser así, además de perfilar la prosperidad de toda la vida futura sobre la Tierra, nuestras decisiones dictarán también el devenir de toda la vida sapiente del universo. Una responsabilidad considerable.

La historia nos da motivos para pensar que lo lograremos. Una de las características más antiguas de nuestra especie es nuestra capacidad para reaccionar ante amenazas existenciales. Parecemos haber sobrevivido a un cuello de botella genético hace unos 75.000 años, cuando un gran cambio climático, causado probablemente por un «invierno volcánico», acabó con la mayoría de los seres humanos. Algo antes, hace ahora entre 200.000 y 160.000 años, los humanos anatómicamente modernos surgieron en África tras una devastadora edad de hielo que exterminó a casi todos nuestros predecesores. El secreto de la supervivencia de nuestros ancestros radicó, probablemente, en la posibilidad de emplear el lenguaje para desarrollar nuevas formas de cooperación social.

Hoy luchamos para abrirnos paso en un Antropoceno incipiente. Si perduramos, tal vez aprendamos a proteger la biosfera terrestre de manera casi indefinida. A la larga, podríamos ser lo mejor que le ha ocurrido al planeta Tierra. IyC

LORENZO GRITTI (*ilustración*); KYLE HILTON (*retrato*)

PARA SABER MÁS

The biosphere. Vladimir I. Vernadsky. Traducido de la edición rusa de 1926 por David B. Langmuir; revisado y anotado por Mark A. S. McMenamin. Copernicus Books, 1998.
Lonely planets: The natural philosophy of alien life. David Grinspoon. Ecco, 2003.
Global catastrophic risks. Dirigido por Nick Bostrom y Milan M. Ćirković. Oxford University Press, 2008.
The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the holocene. Colin N. Waters et al. en *Science*, vol. 351, 8 de enero de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

La humanidad en el espacio. Cameron M. Smith en *IyC*, marzo de 2013.

por H. Joachim Schlichting

H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto para la Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.



Espirales de cera

Si dejamos que la cera líquida de una vela encendida caiga en el agua, veremos surgir hermosas estructuras. El proceso guarda semejanzas con la formación de espirales logarítmicas

En Alemania y en otros países del centro y del norte de Europa tenemos una bella tradición en Nochevieja: sostener una cuchara con plomo —o estaño, que es menos tóxico— sobre la llama de una vela, esperar a que el metal se funda y dejarlo caer de golpe en un cuenco con agua fría. Allí, al solidificarse, el metal adquiere formas extrañas, las cuales podemos interpretar a nuestro antojo y a las que algunos incluso atribuyen poderes adivinatorios.

De niño, a falta de plomo, usaba la cera de la vela, con lo que lograba resultados no menos espectaculares. Además, ello me permitió descubrir un fenómeno casi aún más fascinante: si, en un cuenco con agua, colocaba una vela encendida y tallaba una ranura en el borde para que la cera líquida fuese cayendo, al llegar esta al agua se originaban estructuras que de ningún modo podían ser producto de la casualidad. Siempre me parecía tener ante mí conchas de bivalvos. A pesar de sus diferencias, eran todas tan similares entre sí que, sin duda, había que considerarlas miembros de una misma especie. Incluso cuando obtenía ejemplares «fallidos», el parecido con una concha era más que notable. Ello muestra que el azar que confiere a estas conchas su forma no actúa a ciegas, sino que forma parte de algún proceso autoorganizado.

Crecimiento ordenado

¿Qué es lo que ocurre exactamente? El calor que irradia la llama derrite la cera situada a su alrededor y crea, en el extremo superior de la vela, una especie de depósito con forma de cuenco. El borde de este también se derrite, pero lo hace con mayor lentitud, ya que el aire circundante lo enfría, por lo que acaba elevándose sobre la cera fundida. Así pues, si practicamos una hendidura en el extremo de este pequeño depósito, una parte de la cera líquida escapará al exterior. En su camino de descenso, pequeñas cantidades de cera se quedarán pegadas a la vela y dejarán tras de sí una delgada pasarela antes de solidificarse. Dicha pasarela actúa como guía, a su vez, para las siguientes corrientes de cera.

Cuando la cera alcanza por primera vez la superficie del agua, su parte inferior se solidifica y adquiere una forma similar a la de una escudilla. Dado que la densidad de la cera es menor que la del agua, esta balsa de cera no se hunde; sin embargo, tampoco se desplaza sobre la superficie del líquido, pues permanece unida a la pasarela de cera. Además, como la cera caliente sigue fluyendo, la unión se mantiene flexible; un detalle que, como veremos, reviste importancia.

La cera líquida que aún hay en la balsa se solidifica, siguiendo la tendencia natural de ceder tanto calor y tan rápido como sea posible. De esta manera, comienza a endurecerse allí donde limita con el agua fría, para continuar haciéndolo después en el interior. Dado que, al solidificarse, la cera aumenta de densidad y disminuye de volumen, en medio queda una cavidad a la que va a parar la siguiente oleada de cera caliente. Esta acaba rebosando y, tan pronto como toca el agua, se solidifica y añade otro anillo a la balsa redonda. (La forma anular es la única que garantiza que la superficie de contacto entre la cera recién añadida y el agua —y, con ello, la tensión superficial— sea mínima.)

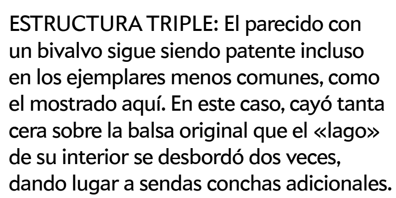
Oleada a oleada y anillo a anillo, la cera que continúa fluyendo se encarga de que la balsa crezca. Con ello se vuelve también más pesada; sin embargo, no toda ella se hunde más en el agua, puesto que sigue suspendida de la pasarela. Esta funciona como una bisagra fijada a la vela, de manera que el borde de la balsa






CAPARAZONES DE CERA: Al solidificarse en el agua, la cera derretida de una vela da lugar a sorprendentes estructuras con aspecto de concha. Esta serie de imágenes reproduce algunos de los ejemplares obtenidos por el autor.




ESTRUCTURA TRIPLE: El parecido con un bivalvo sigue siendo patente incluso en los ejemplares menos comunes, como el mostrado aquí. En este caso, cayó tanta cera sobre la balsa original que el «lago» de su interior se desbordó dos veces, dando lugar a sendas conchas adicionales.



SOLIDIFICACIÓN PREMATURA: En esta estructura, la cera se solidificó sobre la balsa antes de que llegase una nueva oleada. Cuando la nueva cera pasó por encima del borde y llegó hasta el agua, fue acumulándose en forma de gotas, cada una ligeramente superpuesta a la anterior.



TRAMPOLÍN DE GOTAS: Esta configuración se debe a la introducción de un pequeño «trampolín» en la vela. Cada gota saltó desde allí al agua y se alejó flotando, de manera que la siguiente gota la alcanzó a duras penas, con lo que se formó una unión más laxa.

se inclina y se introduce en el agua, tanto más cuanto mayor sea su masa. La nueva cera que llega a la balsa sigue la pendiente más pronunciada; es decir, tiende a dirigirse en línea recta hacia el agua. De esta manera, se origina poco a poco una forma aproximadamente elíptica.

La estructura va expandiéndose en el agua en las tres dimensiones. La forma elíptica crece en la dirección horizontal, con lo que su punto medio se aleja de la vela. Al mismo tiempo, el borde inferior del cuerpo de cera se va hundiendo cada vez más, lo que hace que aumente progresivamente el radio de las circunferencias verticales. Como consecuencia, el fenómeno guarda semejanzas con la ley de crecimiento de una espiral logarítmica: también en estas la distancia al centro aumenta en un mismo factor con cada giro. Por tanto, no es de extrañar que nuestras formaciones de cera se parezcan tanto a las conchas de bivalvos o gasterópodos, ejemplos arquetípicos de espirales naturales.

La morfogénesis de las conchas

Con todo, hay margen más que suficiente para las variaciones. Por ejemplo, podremos comprobar con facilidad que la temperatura del agua influye en el ritmo de solidificación de la cera, lo que ejerce una influencia decisiva en la forma que adoptarán nuestras conchas. A temperaturas bajas, estas suelen ser más curvadas y estrechas, mientras que en un agua más templada resultarán más planas y anchas. Por último, si el agua está demasiado caliente, la estructura pierde su geometría característica y adopta una disposición similar a la de las gotas de aceite en un plato de sopa.

Este pequeño divertimento ha sido objeto de investigaciones científicas. En un artículo de 1993 titulado «Autoorganización en las conchas de cera», Adolf Seilacher y Christian Klug, de la Universidad de Tubinga, describieron los resultados de sus experimentos con cera en condiciones controladas y obtuvieron conclusiones de gran alcance, aunque hasta cierto punto especulativas. Pensaron que la interacción entre la cera líquida y la solidificada se correspondía con la existente entre el tejido vivo de los bivalvos y el duro biomineral de sus conchas. Esa interacción, escribieron, constituiría la clave de la morfogénesis no solo de las conchas, sino también de los esqueletos en general. De ser cierto, nuestro experimento con cera podría contribuir a esclarecer numerosos aspectos evolutivos. Pero, tanto si ocurre así como si no, queda patente que, al igual que en la tradición de Nochevieja, la gracia se encuentra en la interpretación de los resultados.

TODAS LAS FOTOGRAFÍAS SON DE H. JOACHIM SCHLICHTING

PARA SABER MÁS

Selbstorganisation bei Kerzenmuscheln. A. Seilacher y C. Klug en *Naturwissenschaftliche Rundschau*, vol. 46, págs. 132-134, 1993.

Candle wax shells, morphodynamics and the cambrian explosion. A. Seilacher en *Acta Palaeontologica Polonica*, vol. 38, págs. 273-280, 1994.









por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



El problema del cumpleaños y la seguridad de nuestras contraseñas

Aplicaciones criptográficas de un acertijo clásico

Un problema célebre que ilustra con claridad nuestra falta de intuición a la hora de estimar probabilidades es el llamado «problema del cumpleaños». Reza así: ¿cuántas personas deben encontrarse en una sala para que sea más probable que improbable que dos de ellas cumplan años el mismo día?

Obviando años bisiestos y suponiendo que la probabilidad de nacer en un día cualquiera del año es siempre la misma, mucha gente suele razonar de la siguiente ego-manera: «Hay una probabilidad de 1/365 de que una persona cualquiera de la sala haya nacido el mismo día que yo. Por tanto, hay una probabilidad igual a 364/365 de que esa persona y yo no celebremos el cumpleaños el mismo día. Si en la sala somos n personas, entonces la probabilidad de que las $(n-1)$ restantes cumplan años en una fecha distinta que yo es igual a $(364/365)^{n-1}$. Así pues, la probabilidad de que al menos una comparta el cumpleaños conmigo es $1-(364/365)^{n-1}$. Haciendo esta probabilidad igual a 1/2, obtenemos, aproximadamente, $n = 253$ personas».

El razonamiento es válido, pero no responde a la pregunta inicial. Esta nos pedía calcular la probabilidad de que dos personas *cualesquiera* cumpliesen años el mismo día. Eso incluye, por supuesto, la probabilidad de que alguien cumpla años cuando yo lo hago, que es lo que acabamos de calcular. Sin embargo, también comprende la probabilidad de que dos o más personas compartan cumpleaños y que este sea distinto del mío.

Hagámoslo bien. El número de cumpleaños distintos que pueden darse entre n personas es 365^n (la primera persona puede haber nacido cualquier día del año, la segunda también, etcétera). Calculemos primero la probabilidad de que nadie cumpla años el mismo día. Eso puede ocurrir de $365 \times 364 \times \cdots \times (365-n+1)$ maneras distintas (la primera persona puede haber nacido en cualquiera de los 365 días; fijado ese cumpleaños, la segunda solo tiene 364 días posibles, etcétera). De modo que la probabilidad de que no haya cumpleaños coincidentes (c.c.) es:

$$P\,(\text{no c.c.}) = \frac{365 \times 364 \times \cdots \times (365-n+1)}{365^n}\,,$$

lo que nos da una probabilidad complementaria igual a:

$$P\,(\text{al menos 2 c.c.}) = 1 - \frac{365 \times 364 \times \cdots \times (365-n+1)}{365^n}\,.$$

Ahora podremos comprobar que, con solo $n = 23$ personas, dicha probabilidad asciende a 0,507. Moraleja: si bien un hecho puede ser improbable, lo es mucho menos que se dé un caso concreto.

Contrastemos este resultado con datos reales siguiendo al estadístico Robert Matthews. «¿Dónde podemos encontrar de manera natural grupos de 23 personas?», pensó Matthews. Pues en los partidos de fútbol, donde compiten 22 jugadores supervisados por un árbitro. En la tabla que reproducimos a la izquierda figuran diez encuentros de la liga inglesa celebrados el 19 de abril de 1997, en los que participaron 220 jugadores y 10 árbitros. Para cada partido, a la derecha aparecen las coincidencias de cumpleaños entre sus 23 participantes.

Equipos enfrentados	Fechas de cumpleaños coincidentes
Arsenal – Blackburn	Sin coincidencias
Aston Villa – Tottenham	Eliogu (AV; 3/11/72) y Yorke (AV; 3/11/71)
Chelsea – Leicester City	Petrescu (C; 22/12/67) y Morris (C; 22/12/78) Hughes (C; 1/11/63) y Elliott (LC; 1/11/68)
Liverpool – Manchester Utd.	James (L; 1/8/70) y Wright (L; 1/8/63) Butt (MU; 21/1/75) y Neville (MU; 21/1/77)
Middlesbrough – Sunderland	Johnston (S; 14/12/73) y Waddle (S; 14/12/60)
Newcastle – Derby	Sin coincidencias
Nottingham Forest – Leeds	Martyn (L; 11/8/66) y Halle (L; 11/8/65)
Sheffield Wed. – Wimbledon	Sin coincidencias
Southampton – Coventry	Benali (S; 30/12/68) y Whelan (C; 30/12/74)
West Ham – Everton	Sin coincidencias

CUMPLEAÑOS EN EL FÚTBOL: Esta tabla muestra diez encuentros de la liga inglesa celebrados el 19 de abril de 1997 y las coincidencias observadas en los cumpleaños de quienes se encontraban en el campo. En cada partido participaron 23 personas (los 11 jugadores de cada equipo y el árbitro), el mismo número que resuelve el problema del cumpleaños clásico.

Hasta ahora hemos calculado la probabilidad de que haya al menos una coincidencia en un grupo de 23 personas ($P = 0{,}507$) y la de que no haya ninguna ($Q = 1 - P = 0{,}493$). Con un poco de paciencia y con algunas nociones de combinatoria, podemos evaluar también, siempre para un grupo de 23 personas, la probabilidad de que haya exactamente una coincidencia (0,363), dos (0,111), tres

coincidencias (0,018) y una triple (0,007). La tabla inferior compara la teoría con los casos reales. Para calcular los valores esperados, basta con multiplicar la probabilidad correspondiente por el número de partidos (diez en total) y redondear al número entero más próximo.

Podemos ver que el acuerdo entre los valores esperados y las coincidencias observadas es excelente. En particular, los resultados apoyan la idea de que, cuanto menos específica es una coincidencia, más probable resulta que ocurra. Así sucede, por ejemplo, con las seis coincidencias de dos o más cumpleaños cualesquiera. Sin embargo, entre los 230 participantes, no encontramos ninguno que cumpla años el día del encuentro.

Cumpleaños en el sistema solar

El problema del cumpleaños admite todo tipo de generalizaciones. La más obvia consiste en no fijar el número de días en 365, los días de un año terrestre. ¿Cómo cambiaría nuestro resultado si los cumpleaños se refiriesen a los habitantes de Júpiter o Neptuno, por ejemplo?

Con 365 días disponibles, la probabilidad de que al menos dos personas cumplan años en la misma fecha puede reescribirse como:

$$P = 1 - \frac{365!}{(365 - n)!\, 365^n} .$$

Por tanto, si hay N días posibles, la probabilidad de que al menos dos personas tengan cumpleaños coincidentes será

$$P = 1 - Q = 1 - \frac{N!}{(N - n)!\, N^n} .$$

Tipo de coincidencia	Esp.	Obs.
Sin coincidencia	5	4
Al menos una coincidencia	5	6
Solo una coincidencia	4	4
Solo dos coincidencias	1	2
Solo tres coincidencias	0	0
Solo una triple coincidencia	0	0
Que haya alguien que cumpla el día del partido	0	0

TEORÍA Y OBSERVACIONES: Comparación entre los valores esperados y los observados para diferentes tipos de coincidencias entre los cumpleaños de jugadores y árbitros de los partidos mostrados en la tabla anterior. Puede verse que, cuanto más específico es un evento, menos probable es que ocurra.



ISTOCK/EXDEZ (hombre con ordenador); ISTOCK/CHUHAIL (pastel); INVESTIGACIÓN Y CIENCIA (composición)

Esta expresión es exacta, aunque resulta un tanto inmanejable y, desde luego, proporciona valores nada intuitivos. Por ejemplo, Júpiter tarda $N = 10.565$ días jovianos en completar una vuelta alrededor del Sol. Sin embargo, nos bastaría con $n = 121$ habitantes del gigante gaseoso para que $P \approx Q \approx 1/2$. Y si nos fuésemos a Neptuno, con un período orbital de $N = 89.250$ días según transcurren en dicho planeta, deberíamos reunir a un grupo de $n = 352$ neptunianos.

Con todo, el resultado puede aproximarse empleando la famosa fórmula de Stirling para el factorial:

$$N! \sim \sqrt{2\pi}\, N^{N+1/2}/e^N ,$$

la cual funciona de maravilla para valores de N grandes. Tomando logaritmos a ambos lados, llegamos a:

$$\log Q \approx \left(N - n + \frac{1}{2}\right)\log\left(1 + \frac{n}{N - n}\right) - n .$$

Ahora, si suponemos que n es mucho menor que N (circunstancia que parece avalada por nuestros resultados en la Tierra, Júpiter y Neptuno), expandimos el logaritmo en serie de Taylor y nos quedamos con el término dominante del desarrollo en n/N, llegaremos finalmente a:

$$\log Q \approx -\frac{n^2}{2N} ,$$

lo que nos permite obtener la sencilla aproximación:

$$n \approx \sqrt{-2N \log Q} ,$$

Si ahora tomamos $P = Q = 1/2$, podemos escribir $n \approx 1{,}18\sqrt{N}$. Así, para la Tierra tendríamos $n \approx 22{,}54$ (el valor exacto es $n = 22{,}76$); para Júpiter, $n \approx 121{,}28$ (exacto, $n = 121{,}29$), y para Neptuno, $n \approx 352{,}52$ (exacto, $n = 352{,}02$). Reconozcamos que no está nada mal.

El ataque del cumpleaños

Ahora podemos despojar de pasteles y velas el problema del cumpleaños y enunciarlo de la siguiente forma: ¿qué cantidad n de números enteros debemos generar a partir de una distribución discreta y uniforme definida en el intervalo $[1, N]$ para que la probabilidad de que al menos dos de ellos coincidan sea igual a 1/2? La respuesta aproximada sigue siendo $n \approx 1{,}18\sqrt{N}$. Formulado de esta manera, el problema cuenta con numerosas aplicaciones prácticas en ciencias de la computación, donde se conoce como «ataque del cumpleaños».

Supongamos que tenemos una función $f(x)$ que genera N resultados diferentes e igualmente probables. Si N es lo suficientemente grande, sabemos que, tras evaluar la función sobre $n \approx 1{,}18\sqrt{N}$ argumentos distintos, tendremos una probabilidad aproximadamente igual a 1/2 de encontrar al menos un par de números x_1 y x_2 tales que $f(x_1) = f(x_2)$. Cuando eso ocurre, los informáticos suelen decir que se ha producido una «colisión».

En criptografía se usan con frecuencia ciertas funciones que transforman

una cadena de bits de longitud arbitraria en una de longitud fija. Tales funciones se conocen como funciones *hash*, lo que puede traducirse como «funciones picadillo». Por ejemplo, si uso como argumento todo el texto de esta columna hasta **aquí**, la función *hash* estándar SHA-1 (*secure hash algorithm, 1st version*) me devuelve la siguiente cadena de 40 caracteres:

b3cfa0ecf2437f3f1368
1c1224d8ae4b2265a2c2

Sin embargo, si vuelvo a introducir el mismo texto pero sin escribir el acento en la palabra *aquí* final, obtengo:

38cf1eb8d0a1081cc262
d213c809ceade2df9267

Es decir, una cadena de 40 caracteres totalmente distinta, a pesar de que la diferencia entre las dos entradas era mínima. Así pues, una utilidad inmediata de esta función es comprobar si dos ficheros son idénticos: si al usarlos como argumento de una función *hash* obtenemos la misma cadena, podemos estar casi seguros de que uno y otro eran iguales.

¿Por qué digo «casi»? Porque existe la posibilidad de que se produzca una colisión. Por ejemplo, la función SHA-1 genera «picadillos» de 160 bits: ristras de unos y ceros de 160 caracteres de longitud. En los dos ejemplos anteriores, esas secuencias estaban representadas en hexadecimal, la base 16 tan cara para los informáticos. Así pues, nuestra función es capaz de proporcionar hasta $2^{160} \approx 10^{48}$ salidas posibles. Por otro lado, como argumento pueden usarse mensajes con un tamaño máximo de 2^{64} bits, de modo que el número total de argumentos posibles es:

$$\sum_{n=0}^{2^{64}} 2^n = 2^{2^{64}+1} - 1 \approx 10^{3\times 10^{18}} ,$$

una auténtica barbaridad. Dado que el número de argumentos posibles es muchísimo mayor que el de salidas, resulta obvio que existe un gran número de entradas que generan el mismo resultado.

¿Cuántas entradas distintas deberíamos usar para que la probabilidad de colisión fuera igual a 1/2? Aplicando nuestra aproximación al valor $N = 10^{48}$, obtenemos:

$$n = 1{,}18 \sqrt{10^{48}} = 1{,}18 \times 10^{24} .$$

De nuevo, un disparate: si empleásemos nuestra función para generar un millón de resultados por hora, necesitaríamos más de 100 billones de años terrestres (unas 10.000 veces la edad del universo) para lograr una probabilidad de colisión de 1/2.

¿Y de dónde viene lo de «ataque»? Entre otras aplicaciones, las funciones *hash* se usan para evaluar la integridad de ficheros (es decir, comprobar si algún dato ha variado desde su creación), cifrar datos comprometidos o generar identificadores. Por ejemplo, numerosas aplicaciones y páginas web almacenan las contraseñas de sus usuarios en bases de datos cifradas con SHA-1. Cuando introducimos nuestra contraseña, el sistema la convierte en un *hash* y la almacena de esa forma. Al hacerlo así, el servicio desconoce nuestra contraseña. Y, si un pirata informático lograse acceder a la base de datos, lo tendría muy difícil para suplantarnos: lograrlo por fuerza bruta exigiría encontrar alguna de las secuencias que producen nuestro *hash*. Pero, como hemos visto, la cantidad de cadenas que deberíamos introducir para lograr una probabilidad de coincidencia de 1/2 desanimaría a cualquiera. Bueno, a cualquiera excepto a los piratas informáticos. Pero esa es otra historia que tal vez cuente otro día (terrestre). IyC

PARA SABER MÁS

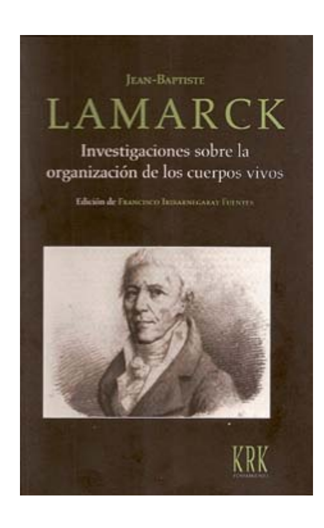
The birthday problem anew. Peter A. Braza en *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, vol. 37, n.º 4, págs. 484-488, 2006.

Coincidences: The truth is out there. Robert Matthews en *Teaching Statistics*, vol. 20, 2007.

Nonplussed! Mathematical proof of implausible ideas. Julian Havil. Princeton University Press, 2007.

EN NUESTRO ARCHIVO

Nunca digas nunca. David J. Hand en *IyC*, mayo de 2014.



INVESTIGACIONES SOBRE LA ORGANIZACIÓN DE LOS CUERPOS VIVOS

Jean-Baptiste Lamarck
Edición de Francisco Iribarnegaray Fuentes
KRK Ediciones, 2016

¡Una lanza por Lamarck!

El retorno de los caracteres adquiridos

En una carta dirigida a Thomas Henry Huxley, fechada en Down el 28 de diciembre de 1859, Charles Darwin, al final, escribe en una posdata: «La ciencia es terreno tan angosto que solo un gallo puede reinar en el gallinero». Hacía apenas un mes, el 24 de noviembre, había visto por fin la luz *El origen de las especies*, y Darwin ya anticipaba su inminente coronación como nuevo rey del gallinero. El gallo destronado era Richard Owen (1804-1892).

Acaso la ciencia sea un lugar angosto, pero lo que es seguro es que a menudo es una pelea de gallos, y pocos ejemplos de ello son tan claros como el de la biología de finales del siglo xviii y la primera mitad del xix. Richard Owen, el predecesor de Darwin en el particular olimpo de la biología, tuvo también sus adversarios intelectuales, encarnados sobre todo en las figuras de Étienne Geoffroy Saint-Hilaire (1772-1844) y Robert Edmond Grant (1793-1874), los principales defensores de las ideas de Jean-Baptiste Lamarck en Francia y Gran Bretaña, respectivamente. Owen se batió con Lamarck solo indirectamente, ya que inició su carrera allá por 1830, un año después de la muerte del francés, y en la Francia de la Restauración la biología estaba en manos de Georges Cuvier (1769-1832) y de su antagonista Geoffroy. Las ideas de Lamarck, sin embargo, seguían bien vivas, y Owen puso gran empeño en combatir algunas de ellas.

El modelo evolutivo lamarckiano se basaba en la idea de transmutación de las especies: un proceso según el cual los animales de una determinada clase (por ejemplo, los peces) eventualmente se transmutarían en organismos de la clase inmediatamente superior (en este caso, los reptiles), en una concepción meramente lineal de las relaciones históricas entre las diferentes clases de animales, entendidas como una serie, esta sí, inmutable, que siempre respetaba un orden fijo. La vida en la Tierra se iría constantemente renovando gracias a repetidos eventos de generación espontánea, los cuales serían el punto de partida de nuevos procesos de transmutación que seguirían escrupulosamente el orden que llevaría a los mamíferos terrestres.

Este modelo comportaba algunas predicciones muy claras en dos ámbitos centrales para la biología de aquellos tiempos, como eran la paleontología y la embriología. Dichas predicciones estaban estrechamente relacionadas entre sí, y sugerían que el registro fósil sería una fiel muestra de esa evolución serial en la que, en sentido estricto, no cabía la idea de extinción, ya que las especies solo desaparecían para dar lugar a nuevas especies, sin vías muertas. Análogamente, la ontogénesis mostraría también esa relación serial, de tal modo que el organismo en desarrollo pasaría por diferentes estadios que se corresponderían con los de su historia como especie, lo que más tarde se conocería con el nombre de recapitulación.

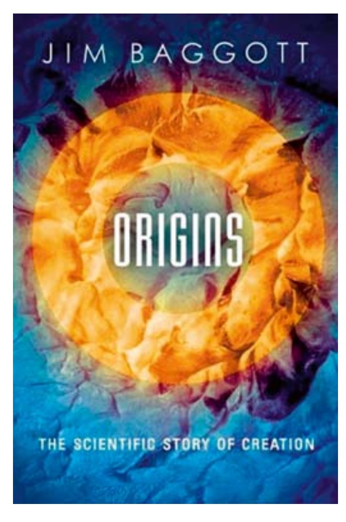
Owen demostró que esa visión del orden natural era errónea, que nada en el registro fósil permitía «leer» una relación histórica serial entre las especies, que hubo vías muertas que no han dejado descendencia en las especies actuales y, sobre todo, que el desarrollo nunca es una recapitulación de la historia evolutiva del organismo. Lamarck estaba equivocado, sí, pero ni Owen ni Darwin hallaron o expusieron argumento alguno en contra de una de las ideas de Lamarck más ferozmente caricaturizada aun en nuestros días: la herencia de los caracteres adquiridos. De hecho, en más de una ocasión no dudaron en abrazarla de forma más o menos explícita como la única teoría de la herencia mínimamente plausible en aquellos tiempos. De hecho, fue la única disponible hasta que August Weismann (1834-1914) propusiera su teoría del plasma germinal en 1892, presentándola como la muerte definitiva de la herencia de los caracteres adquiridos.

La historia que sigue es bien conocida. En 1900, Hugo de Vries redescubre los trabajos de Mendel y se inicia así el proceso que dará lugar a lo que se conoce como Nueva Síntesis, el nuevo darwinismo articulado alrededor de dos ejes centrales formados por la selección natural y la genética mendeliana, reconstruida esta última sobre la base del modelo de herencia weismanniano, que rechaza tajantemente la transmisión de un carácter por otra vía que no sea la de la célula reproductiva. Diríase que Lamarck había muerto definitivamente. Pero no, porque desde mediados de la década de los noventa venimos ampliando nuestros conocimientos con nuevas pruebas de que la herencia de los caracteres adquiridos o, si se prefiere, la herencia epigenética, ya no es la fantasía de un sabio francés de la Ilustración, sino un hecho [*véase* «Un nuevo tipo de herencia», por Michael K. Skinner; Investigación y Ciencia, octubre de 2014]. Un hecho que, sin duda, alterará sustancialmente nuestra manera de entender los procesos biológicos.

Es, por tanto, necesario volver a leer a Lamarck. ¿Y qué mejor manera de empezar a hacerlo que acudiendo a esta cuidada edición de una de sus obras más representativas? KRK Ediciones vuelve a regalarnos un nuevo volumen de su imprescindible colección Pensamiento: el número 38 ya, esta vez de la mano de Francisco Iribarnegaray Fuentes como responsable tanto de la traducción como de la edición. Una excelente propuesta, pues la obra condensa los elementos principales del pensamiento lamarckiano en un texto aún hoy accesible, más si cabe gracias al trabajo de su traductor, que salva con pericia los obstáculos terminológicos que suelen plantear los textos de los primeros tiempos de la biología científica.

KRK ha comprendido que la biología no es territorio tan angosto como pensaba Darwin y que habrá que habilitar nuevos espacios que Darwin deberá compartir con otros. Lamarck, sin duda, será uno de ellos.

—Sergio Balari
Universidad Autónoma de Barcelona



ORIGINS
THE SCIENTIFIC STORY OF CREATION
Jim Baggott
Oxford University Press, 2015

Orígenes

Relato científico del génesis

Las grandes civilizaciones poseen su propia explicación del origen del mundo, de la vida y del hombre. Suelen ser relatos simbólicos muy hermosos. En Occidente, el libro bíblico del Génesis ha tenido una importancia determinante a lo largo de la historia, y no solo en el dominio de lo religioso. Recuérdese que las primeras expediciones botánicas se realizaron en búsqueda del jardín del Edén. En el curso del último siglo se han dado pasos decisivos hacia la construcción de un relato científico de nuestros orígenes. Dicho relato queda expuesto con rigor en *Origins*, de Jim Baggott.

¿Cuál es la naturaleza del mundo material? ¿Qué es el universo y cómo se formó? ¿Qué es la vida? ¿De dónde venimos? ¿Cuál fue el curso de nuestra evolución? ¿Cómo y por qué pensamos? ¿Qué significa ser humano? ¿Cómo conocemos? Tenemos un deseo innato e insaciable de saber, de comprender el lugar que ocupamos en el universo, de entender cómo se produjo todo cuanto nos rodea. Este deseo es a veces mera curiosidad, pero otras viene motivado por una necesidad profunda de descubrirle un sentido al mundo que nos sirve de hogar. Para explicar qué sucedió entre la gran explosión inicial y la aparición del ser humano inteligente, unos 13.800 millones de años más tarde, se han desarrollado diversas disciplinas, de la cosmología y la física de partículas a la geología y la biología. Importa siempre distinguir entre hechos e interpretaciones. Así se hace en esta secuencia cronológica.

Sabemos que el universo está en expansión. Si nos retrotraemos hacia atrás, llegaremos a un momento de su historia en el que toda la energía del cosmos se encontraba compactada en un punto, a partir del cual «explotó» en lo que ha dado en llamarse «gran explosión» (*big bang*). Este relato de la creación, como se autodefine, comienza, pues, con el origen del espacio, el tiempo y la energía. Billonésimas de segundo después apareció la masa. Transcurridos unos 380.000 años se liberó un diluvio de radiación electromagnética caliente que hoy identificamos con la radiación cósmica de fondo fría. En esa época de la historia del universo estaban ya disponibles los bloques básicos de construcción: espacio, tiempo, materia (materia oscura y átomos de hidrógeno y helio) y luz. Pasados entre 300 y 500 millones de años de la gran explosión, se formaron las primeras estrellas y se estructuraron las galaxias. Las moléculas surgieron a los 1800-3800 millones de años desde el inicio; a los 9200 millones de años, el sistema solar y la Tierra. Para explicar la física subyacente se han ideado modelos cosmológicos inflacionarios y el modelo estándar de la física de partículas.

Se intenta desentrañar la evolución del espacio y del tiempo, de la masa y la energía a partir de la teoría general de la relatividad, una teoría de extraordinaria solidez. Sin embargo, cuando se trata de objetos microscópicos, hemos de recurrir a una estructura conceptual completamente distinta: la teoría cuántica. En las aproximaciones al origen del universo suele distinguirse un tiempo de Planck (desde el instante cero hasta 10^{-43} segundos), la época de la gran unificación (desde 10^{-43} hasta 10^{-35} segundos) y la de inflación cósmica (desde 10^{-35} hasta 10^{-32} segundos). No puede haber distancia más corta que la longitud de Planck

($1{,}6 \times 10^{-35}$ metros) ni tiempo más corto que el tiempo de Planck ($5{,}4 \times 10^{-44}$ segundos), el tiempo que tarda la luz en recorrer la longitud de Planck. De momento no se ha conseguido unificar la teoría de la relatividad con la teoría cuántica en una teoría de orden superior.

Las primeras estrellas y galaxias, formadas unos cientos de millones de años después del origen del cosmos, reflejan la falta de homogeneidad en la distribución de materia, impresa por la inflación en las macroestructuras del universo. En el proceso de nucleosíntesis que se desarrolla en el interior de las estrellas se produce un amplio repertorio de elementos químicos, del helio al hierro. Para explicar la existencia de elementos más pesados se requieren explosiones cataclísmicas de supernova. El polvo y vapor eyectados en las explosiones estelares generan moléculas interestelares, muchas de las cuales resultan ahora de interés en la química de la vida. Esas moléculas sembraron las nubes interestelares que gradualmente se fueron uniendo, hasta que terminaron por colapsar y formar nuevas estrellas con sus sistemas planetarios asociados [*véase* «El origen astroquímico de los sistemas planetarios y la vida», por Rafael Bachiller; Investigación y Ciencia, abril de 2015].

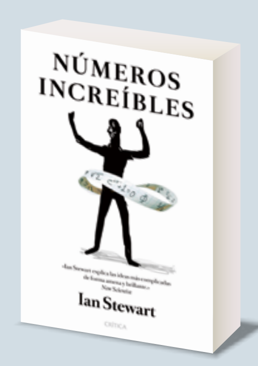
Hace unos 4600 millones de años tuvo lugar la formación del sistema solar a partir de una nube molecular gigante en rotación que se contrajo y condensó. El polvo de las regiones exteriores de esa nube originó las primeras rocas y metales. Acrecieron e integraron planetesimales que, andando el tiempo, se combinaron para formar los planetas interiores. La Tierra se diferenció en núcleo, manto y corteza, océano y atmósfera. La convección de un manto fluido indujo el movimiento de los continentes. Nuestro planeta adquirió la Luna tras el choque contra otro cuerpo de tamaño planetario. La realineación de los planetas exteriores precipitó el Bombardeo Intenso Tardío, en el que billones de toneladas de roca y hielo impactaron contra la superficie. Tenemos luego una Tierra cálida y ya bastante estable, salpicada de sustancias químicas orgánicas esenciales para la vida y con sistemas geológicos en las profundidades oceánicas que podrían actuar como factorías de compuestos bioquímicos a partir de moléculas inorgánicas simples.

El registro fósil revela que los primeros organismos unicelulares existieron en la Tierra hace unos 3500 millones de años. La abiogénesis, o generación espontánea de vida a partir de materia inerte, persiste envuelta en el misterio. Contamos con varias teorías, pero no existe ningún modelo canónico sobre el origen de la vida [*véase* «El origen de la vida», por James Trefil, Harold J. Morowitz y Eric Smith; Investigación y Ciencia, septiembre de 2009]. Los primeros seres unicelulares aprovecharon la fotosíntesis para liberar oxígeno a la atmósfera. El oxígeno abrió una nueva oportunidad para los ensayos de la evolución. Se fusionaron organismos unicelulares y se crearon células complejas, organismos multicelulares. Tras 2800 millones de años de evolución, aparecieron los primeros animales.

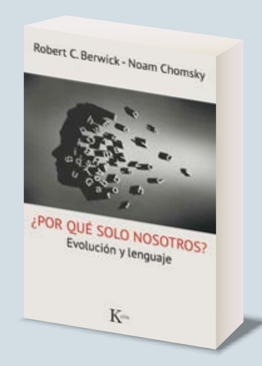
El relato de los últimos 540 millones de años de la historia de la Tierra es propio de una epopeya que se corona con el advenimiento del hombre y su consciencia, último baluarte que se propone asaltar la ciencia. Como una epopeya está contada esta historia de la creación, una epopeya de números y leyes físicas, de conceptos termodinámicos y cocientes de encefalización.

—Luis Alonso

NOVEDADES



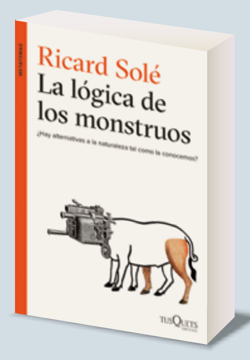
NÚMEROS INCREÍBLES
Ian Stewart
Crítica, 2016
ISBN: 978-84-9892-948-5
424 págs. (23,90 €)



¿POR QUÉ SOLO NOSOTROS?
EVOLUCIÓN Y LENGUAJE
Robert C. Berwick y Noam Chomsky
Kairós, 2016
ISBN: 978-84-9988-526-1
224 págs. (16 €)

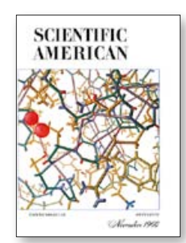


LA MATERIA OSCURA Y LOS DINOSAURIOS
LA SORPRENDENTE INTERCONECTIVIDAD DEL UNIVERSO
Lisa Randall
Acantilado, 2016
ISBN: 978-84-16748-11-2
512 págs. (27 €)



LA LÓGICA DE LOS MONSTRUOS
¿HAY ALTERNATIVAS A LA NATURALEZA TAL COMO LA CONOCEMOS?
Ricard Solé
Tusquets, 2016
ISBN: 978-84-9066-322-6
256 págs. (18 €)

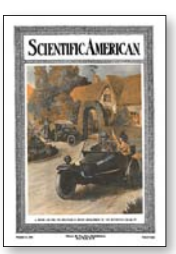
Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Noviembre 1966

China industrial

«En agosto de 1960, a consecuencia de las críticas chinas a los dirigentes rusos, la URSS retiró de China a sus consejeros técnicos y especialistas. Las factorías en construcción y las ya en funcionamiento se quedaron sin personal cualificado. Enfrentado a la necesidad de formar a su propia gente para acabar los proyectos y explotar las factorías, el Gobierno chino lanzó un nuevo eslogan: "autodesarrollo". Desde 1960, China dependía esencialmente de sus propios recursos para la formación de ingenieros, especialistas e investigadores. Se tornó retraída y fuertemente recelosa en sus tratos con otros países, comunistas o no, amigos u hostiles. Temía que aquellos con los que podía comerciar se disponían a "robarle". Tal sentimiento no carecía de cierta base, pues parte de los equipos que China había comprado a países comunistas habían resultado obsoletos.»



Noviembre 1916

Reservas de sal

«Esta ciudad de casi un millón de habitantes es Tzuliutsing, en China, donde se ubican el mayor número de los pozos de sal más productivos de la provincia de Sichuan y de China. Al llegar a esta ciudad por la carretera procedente del más cercano puerto del tratado, Chungking, nos parece al principio como si nos adentrásemos en una zona petrolífera, pues por todas partes vemos altas torres de perforación y oímos el chirrido de las poleas y el arreo de los búbalos. Los procedimientos que se usan aquí son en esencia tan evidentemente iguales a los que se siguen en Europa y América para abrir pozos y en los campos petrolíferos que uno siente una buena dosis de admiración por el ingenio de los chinos, quienes llevan utilizando esos métodos hace más de mil años.»

Aleaciones del acero

«La producción de metales aleados, una actividad inédita, ha adquirido de repente una importancia especial, a impulsos de la necesidad de aprovechar económicamente las reservas de hierro. Los mayores ahorros en perspectiva se cifran en las aleaciones con metales raros, las cuales brindan un aumento drástico de la resistencia, junto con un menor consumo de material. El uso de wolframio y vanadio viene de antiguo; al molibdeno le aseguran sus productores un futuro que rebasa de largo al de cualquiera de sus competidores. Se dice que los grandes cañones con los que Alemania produjo tan gran destrucción cuando su preparación artillera pilló al mundo por sorpresa en 1914 eran de molibdeno; que, con un contenido de esa sustancia del tres al cuatro por ciento, su duración era veinte veces superior a la de los cañones ordinarios.»

Horario para ahorrar luz

«Aunque es demasiado pronto para emitir un juicio definitivo acerca del éxito de las pruebas sobre el empleo del horario de verano efectuadas el último estío en diversos países europeos, los informes disponibles hasta ahora son casi todos favorables. El cónsul general de EE.UU. informa que con el nuevo horario los vieneses consumieron 142.000 dólares menos de gas. En Inglaterra se dice que la satisfacción con el plan ha sido general, habiendo sido aceptado incluso por los agricultores, quienes en principio se oponían a él.»

Nata eléctrica

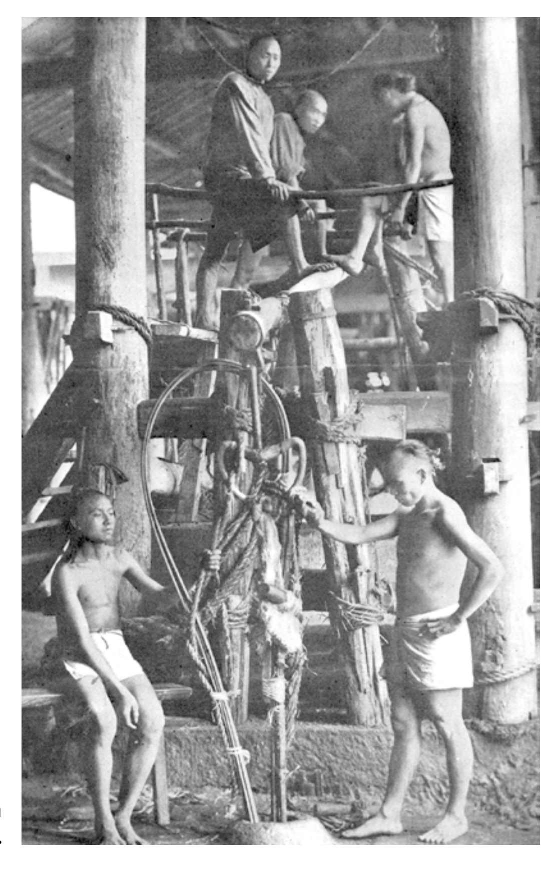
«Una montadora de nata accionada eléctricamente es la última incorporación al creciente ejército de aparatos eléctricos. Se compone de una tolva de unos cuatro litros, equipada de una batidora o agitador mecánico. Esta pieza es movida, a través de un engranaje, por un motor eléctrico de un octavo de caballo que puede conectarse al zócalo de lámpara más cercano mediante un cable de tres metros.»



Noviembre 1866

¿Aceite de esperma o de petróleo?

«Según *Enginering*, en los ferrocarriles de Boston y Worcester y de Boston y Maine se está experimentando con aceites de petróleo y de esperma de ballena para determinar cuál es mejor como lubricante. Los resultados fueron como sigue: en cada línea se colocaron sendos vagones en perfecto estado, y se usó solo el de esperma en un *bogie* y solo el de petróleo en el otro *bogie* de cada vagón. Tras 30.000 kilómetros de recorrido, todos los ejes y cojinetes se hallaron en buen estado, con un desgaste regular en todas partes, pero con un consumo de aceite un 20 por ciento inferior en el caso del petróleo. Ya solo se emplea ese lubricante. Este, de la mejor calidad, del todo igual al menos a la del aceite de esperma puro, se compra ahora a 13,20 centavos el litro. El precio del litro de aceite de esperma es de 75,20 centavos.»



1916: Técnica de extracción de sal en China.

SCIENTIFIC AMERICAN SUPLEMENT, VOL. LXXXII, N.º 2133, 18 DE NOVIEMBRE DE 1916



CLIMA

Tras la pista de El Niño

Emily Becker

Las condiciones meteorológicas extremas se atribuyen con frecuencia a este caprichoso e influyente fenómeno climático. Un minucioso análisis de su último ciclo revela una realidad más sutil.

HISTORIA - 300 AÑOS DE LA MUERTE DE LEIBNIZ

El reloj de agua perfecto y el principio de mínima acción

Hartmut Hecht

Los manuscritos de Gottfried Wilhelm Leibniz muestran a un filósofo natural a la altura de Isaac Newton.

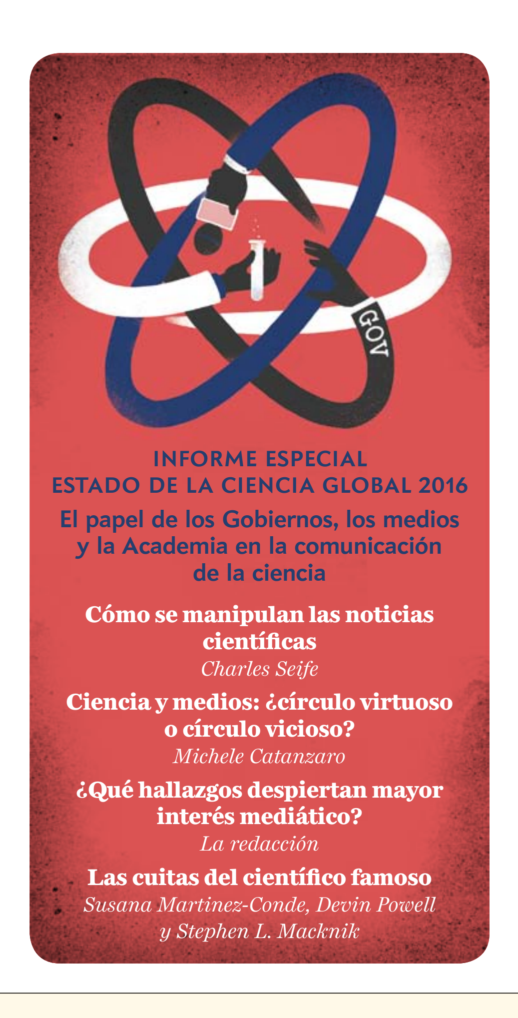


NEUROCIENCIA

Una mirada al interior del cerebro

Karl Deisseroth

Un nuevo método experimental en la interfaz entre la química y la biología permite indagar en lo más profundo del centro de control del cuerpo.



INFORME ESPECIAL
ESTADO DE LA CIENCIA GLOBAL 2016

El papel de los Gobiernos, los medios y la Academia en la comunicación de la ciencia

Cómo se manipulan las noticias científicas
Charles Seife

Ciencia y medios: ¿círculo virtuoso o círculo vicioso?
Michele Catanzaro

¿Qué hallazgos despiertan mayor interés mediático?
La redacción

Las cuitas del científico famoso
Susana Martinez-Conde, Devin Powell y Stephen L. Macknik

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Clara Moskowitz, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
PUBLISHER AND VICE PRESIDENT Jeremy A. Abbate

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes* y *La amenaza de la desigualdad*; Andrés Martínez: *Apuntes* y *Modificar nuestra herencia*; Sara Arganda: *Desplegar el cerebro*; Mercè Piqueras: *Cada vez más obesos*; Fabio Teixidó: *Una historia estratificada, Adaptación climática* y *Supervivencia profunda*; Marián Beltrán: *Vivir en un mundo superpoblado*; Alfredo Marcos: *Transhumanismo: entre el mejoramiento y la aniquilación*; Juan Manuel González Mañas: *Vivir hasta los 120 años*; Jordi Vallverdú y Juan Pedro Campos: *Más que humanos*; Javier Grande: *Espirales de cera*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España